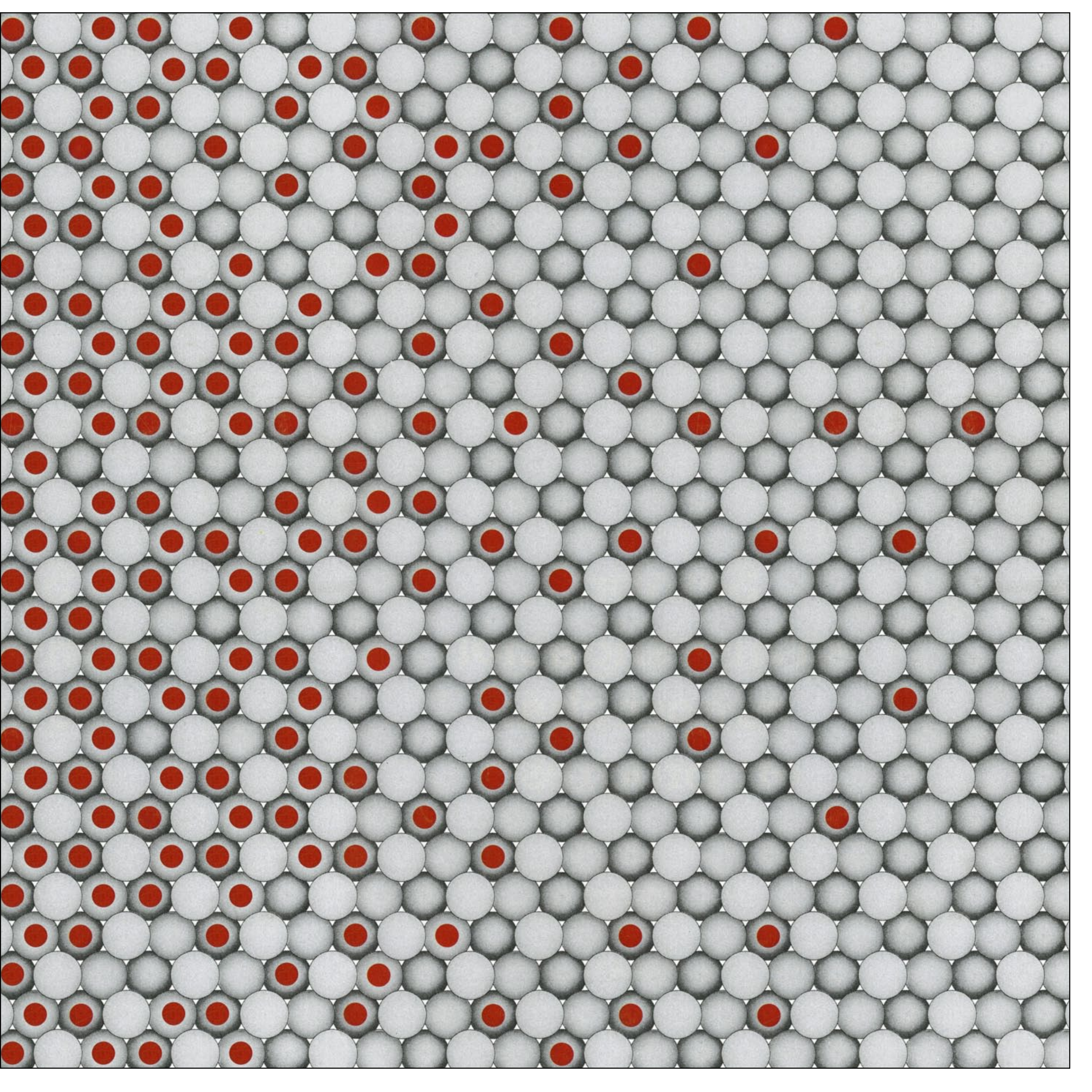
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



DIFUSION SUPERFICIAL

Octubre 1982

300 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 73
Octubre 1982

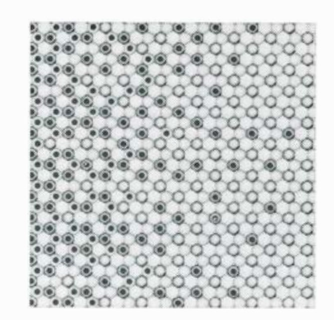


Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:
Manuel Puigcerver: *Dióxido de carbono y clima mundial;* T. Roca Cortés: *Las coronas de las galaxias;* Martha E. Messman: *La alergia;* Amando García Rodríguez: *Difusión superficial;* Javier Niell: *Coevolución de mariposas y enredaderas;* Montserrat Domingo: *Ofiolitas;* Juan Pedro Acordagoicoechea: *El caso Galileo;* Luis Bou: *Temas metamágicos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Ramon Cerdà, L. J. Boya, J. Vilà, J. P. Martínez y E. Herrero



LA PORTADA

La ilustración de la portada representa un esquema de la difusión de átomos adsorbidos sobre una faceta individual de un cristal metálico perfecto (véase "Difusión superficial", por Robert Gomer). El cristal está constituido por átomos de tungsteno, representados en color gris, formando una estructura ordenada denominada red cúbica centrada en el espacio. Los átomos que constituyen la superficie del cristal presentan una configuración regular, característica de la orientación del plano de la superficie respecto a la estructura de la red cristalina. El plano considerado aquí es rugoso a escala atómica. La difusión de átomos a lo largo de la superficie tiene lugar con mayor lentitud de lo que sucedería si la superficie fuera lisa. Los átomos adsorbidos en la superficie, representados en color rojo, se mueven desde las regiones en que la concentración es alta hasta las regiones en que la concentración es baja (*de izquierda a derecha*).

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.300 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
340 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
440 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.°, Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración de la portada de Gabor Kiss

Página	Fuente
10	Space Systems Division, General Electric Company
12-19	Allen Beechel
20-23	M. Alonso y P. Molera
24-25	P. Molera
26	P. Molera (*arriba*) M. Alonso y P. Molera (*abajo*)
27	P. Molera
29	Renzo Sancisi, Kapteyn Laboratory
30-31	Walken Graphics
32	Walken Graphics (*arriba*), Klaas S. de Boer y Blair D. Savage (*abajo*)
33-36	Walken Graphics
41	David J. Lim, Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Ohio (*arriba*); Laboratorio de acarología de la Universidad estatal de Ohio (*abajo*)
42	Ernesto O. Hoffmann, Facultad de Medicina de la Universidad de Louisiana
43-48	Bunji Tagawa
51	Instituto James Franck de la Universidad de Chicago (*izquierda*); Gabor Kiss (*derecha*)
52-57	Jerome Kuhl
58	Instituto James Franck
59-63	Jerome Kuhl
65-68	Tom Prentiss
70-71	Ilil Arbel
72	Lawrence E. Gilbert, Universidad de Texas en Austin
75	Earth Satellite Corporation
76	Andrew Tomko
78-79	Ian G. Gass, Open University
80-84	Andrew Tomko
86	Houghton Library for Rare Books, Universidad de Harvard
88	Biblioteca Nacional Central, Florencia
90	Ilil Arbel
92	Archivos Secretos del Vaticano
93	Biblioteca Nacional Central, Florencia
94	The New York Public Library, Fundaciones Astor, Lenox y Tilden
95-96	Archivos Secretos del Vaticano
106	Jearl Walker
107-112	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

ROGER REVELLE ("Dióxido de carbono y clima mundial") es profesor de ciencia y gestión pública en la Universidad de California en San Diego. Se graduó en Pomona en 1929 y marchó a la Universidad de California para obtener el doctorado en 1936. Ese año ingresó en el cuerpo docente de la Institución Scripps de Oceanografía como ayudante de prácticas, llegando con el tiempo a ser profesor de oceanografía. Desde 1951 hasta 1964 fue director de la Institución Scripps. En 1964 se trasladó a Harvard como titular de la Cátedra Richard Saltonstall de política de la población. Desde 1964 hasta 1967 fue director del Centro de Estudios de Población en Harvard. Regresó a San Diego en 1967. Revelle ha desempeñado muchos cargos públicos. Fue el primer presidente de la comisión de ciencia y tecnología del desarrollo de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos y miembro de la delegación norteamericana en la conferencia sobre ciencia y tecnología del desarrollo de las Naciones Unidas. En 1974 presidió la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia. Su interés por la incidencia del dióxido de carbono sobre el ambiente se remonta a sus días de estudiante de segundo ciclo. "Mi primer trabajo científico importante se refería al papel de los iones carbonato y biocarbonato y del ácido carbónico disuelto en el control de la concentración del ion hidrógeno en el océano."

PEDRO MOLERA SOLA ("La farga catalana") es profesor de metalurgia de la Universidad de Barcelona, donde recibió el doctorado en ciencias químicas en 1973. Ha trabajado en pulvimetalurgia, en corrosión y en la farga, de cuyas especialidades ha dictado cursos en Bogotá (Colombia), en Oporto y Lisboa (Portugal), en Prades (Francia) y en la Universidad Autónoma de Barcelona. Es autor de numerosos trabajos de investigación y varios libros.

KLAAS S. DE BOER y BLAIR D. SAVAGE ("Las coronas de las galaxias") son astrofísicos que comparten el interés del estudio de los gases difusos que ocupan el espacio entre estrellas y galaxias espirales. De Boer se formó en la Universidad de Groningen. Desde 1971 a 1974 perteneció al claustro de la Facultad de Ciencias de dicho centro superior. Desde 1974 a 1977 se encuadró en el grupo de investigación espacial holandés y trabajó en el equipo ultravioleta del Satélite Astronómico Holandés. En 1978 se trasladó a Estados Unidos en calidad de investigador asociado de la Universidad de Wisconsin en Madison. Desde 1981 se encuentra en Tübingen. Savage procede de la Universidad de Cornell, aunque se doctoró por Princeton. Trabajó dos años (1967-1968) en esta última universidad. Luego se incorporó a la de Wisconsin en Madison, de la que es catedrático.

PAUL D. BUISSERET ("La alergia") pertenece al cuerpo docente de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Louisiana. Procede de la Universidad de Leeds. Terminada la carrera, se dedicó durante unos años a la medicina general. Desde 1971 hasta 1976 trabajó en el Hospital St. Mary de Londres, al tiempo que daba clases en el Instituto Wright-Fleming de microbiología. Desde 1976 hasta 1979 enseñó en la Facultad del Hospital Clínico Infantil de Londres, donde llevó a cabo el trabajo en que se ha basado este artículo.

ROBERT GOMER ("Difusión superficial") es profesor de química y director del Instituto James Franck de la Universidad de Chicago. Austríaco de nacimiento, se trasladó con su familia a Escocia en el año 1938, poco después de la anexión de Austria por Alemania. Tras una corta estancia en Escocia, la familia marchó a los Estados Unidos. Gomer obtuvo su licenciatura en el Pomona College en 1944 y su doctorado en la Universidad de Rochester en 1949. Tras un año de trabajo postdoctoral en la Universidad de Harvard, se incorporó a la Facultad de Chicago. Su trabajo se ha desarrollado principalmente en los campos de la difusión y la adsorción; también ha realizado algunas investigaciones en electroquímica. Como él mismo escribe, "tras asistir a un seminario sobre el microscopio de emisión de campo de E. W. Müller, construí uno de estos instrumentos y lo desarrollé en forma tal que se convirtiera en una herramienta adecuada para el estudio de las superficies".

LAWRENCE E. GILBERT ("Coevolución de mariposas y enredaderas") dirige el Brackenridge Field Laboratory de la Universidad de Texas en Austin, donde enseña zoología. En 1971 recibió el doctorado por la Universidad de Stanford. De aquí pasó a la de Texas. Su principal línea de investigación se centra en el estudio de la organización social y demográfica de los insectos fitófagos. "Mi interés por las relaciones insecto-planta nació probablemente cuando ayudaba a mi abuelo en su negocio de apicultura, en el sur de Texas, en los veranos de mi juventud".

IAN G. GASS ("Ofiolitas") es profesor de ciencias de la tierra en la Universidad Nacional a Distancia, de Gran Bretaña. Nacido en este país, pasó su primera infancia en Birmania. La historia recabó su primer interés académico, pero la Segunda Guerra Mundial interrumpió su carrera universitaria y en el transcurso de cuatro años de servicio militar fue sintiéndose atraído por la geología. Finalizada la guerra, regresó a la Universidad de Leeds decidido a matricularse en geología. Terminados los estudios (1952), trabajó en los servicios geológicos de Sudán y Chipre. En ambos casos hubo de marcharse contra su voluntad cuando el país alcanzó la independencia. "Entonces decidí probar la vida académica, ya que no me atraía la perspectiva de ser reiteradamente cesado de un imperio colonial británico que empequeñecía." En 1960 obtuvo su doctorado por Leeds.

OWEN GINGERICH ("El caso Galileo") es profesor de astronomía y de historia de la ciencia en la Universidad de Harvard. Participa también en la dirección del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano. Estudió en Goshen College y en Harvard, en donde se doctoró en filosofía en 1962. De 1955 a 1958 estuvo adscrito a la Universidad Americana de Beirut. En 1958 y 1959 dio cursos de astronomía en el Wellesley College. En 1960 fue instructor en Harvard, recibiendo el nombramiento de profesor en 1969. Su investigación se ha centrado en la astrofísica y en la historia de la astronomía. En astrofísica se ha ocupado preferentemente de la atmósfera del Sol. Su investigación histórica se ha centrado en la obra de Johannes Kepler y de Nicolaus Copérnico. Gingerich señala que en su artículo sobre el caso Galileo le han servido las puntualizaciones del Rev. Ernan McMullin y el Rev. Joseph Clark. Gingerich agradece también la ayuda de George V. Coyne, S. J., director del Observatorio Vaticano.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos años

Se creó en Madrid la Academia de Matemáticas. Rey Pastor consideró su fundación como "acontecimiento capital en la historia de las ciencias exactas en España", aunque el ilustre matemático no acertó a situarla adecuadamente, quizá por su tendencia a proyectar hacia el pasado los supuestos de la ciencia contemporánea. La Academia de Matemáticas surgió del ambiente creado en la corte por la convivencia de los cosmógrafos con los arquitectos e ingenieros civiles al servicio de Felipe II y también con destacados artilleros o ingenieros militares. En la iniciativa pesó, en primer término, la preocupación existente en la España del último tercio del siglo por fomentar la enseñanza de las matemáticas, con vistas a sus aplicaciones de carácter pragmático. Esas aplicaciones tenían vertientes tan distintas como el cálculo mercantil, la fundamentación de la cosmografía, la astrología y el arte de navegar, o el uso para problemas concretos del arte militar y la técnica de la construcción. Esta última parece que tuvo una influencia particularmente directa en la fundación de la Academia. En el nombramiento de su primer profesor (1582), Felipe II afirmó que su deseo era "que en nuestro reino haya hombres expertos que entiendan bien las matemáticas y la arquitectura y las otras ciencias y facultades anejas". También las Cortes reunidas en Madrid seis años más tarde acordaron, como antes hemos dicho, que se promoviera en todas las ciudades la organización de cursos de matemáticas por "el aprovechamiento de los oficios públicos que resultarán de la misma ciencia", poniendo como ejemplo los maestros de obras y arquitectos. La idea de la fundación partió de Juan de Herrera, que fue también su primer director. Este puesto quedó asociado al cargo de arquitecto real y por ello, tras la muerte de Herrera, lo ocuparon sucesivamente Francisco de Mora y Juan Gómez de Mora. Los arquitectos no monopolizaron, sin embargo, la Academia. Sus primeros profesores fueron Juan Bautista Labaña, cosmógrafo real; Pedro Ambrosio de Ondériz, primer cosmógrafo del Consejo de Indias, al separarse este puesto del de cronista; y Luis Georgio, que era cartógrafo. Más tarde, entre sus miembros más destacados figuraron cultivadores de la ingeniería militar como Cristóbal de Rojas y Julio César Firrufino.

Otro factor que influyó en la creación de la Academia de Matemáticas fue el lulismo. La formalización del conocimiento científico propuesta por Lull, que había tenido numerosos seguidores en la España renacentista, llegó a pesar de modo muy notable en el ambiente científico de la corte de Felipe II. Uno de sus más entusiastas defensores fue precisamente Juan de Herrera, autor de un *Discurso sobre la figura cúbica* de estricta inspiración luliana y en cuya biblioteca particular figuraban ciento dieciocho obras de Lull y sus seguidores en latín, catalán, castellano e italiano. En su testamento llegó incluso a dotar en su valle asturiano natal "una lectura de la doctrina luliana (...) porque yo he sido aficionadísimo a dicho autor Raimundo".

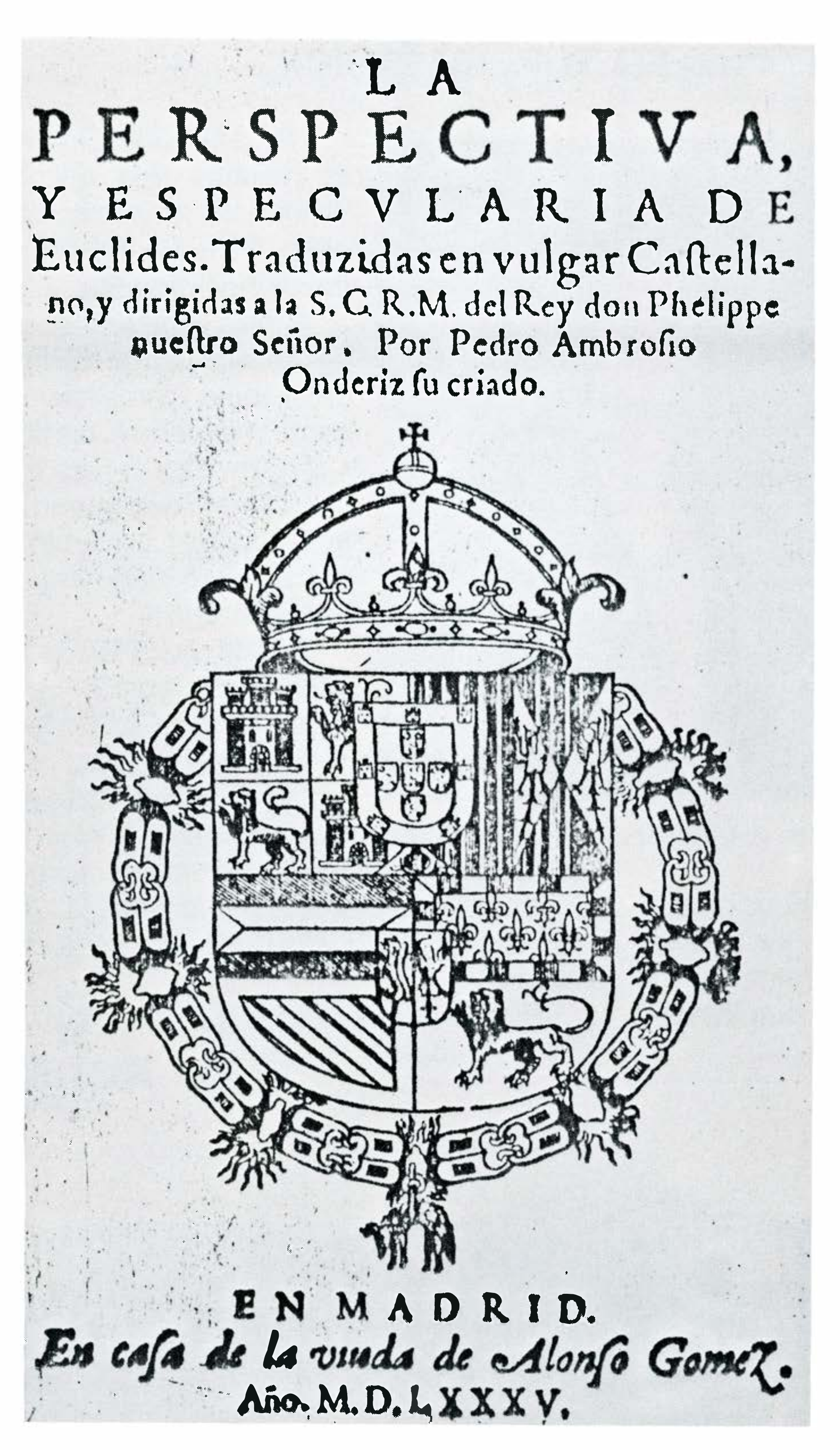
El más destacado paladín del lulismo en dicho ambiente fue, sin embargo, Pedro de Guevara, preceptor de las infantas. Por encargo de Felipe II, publicó un *Arte general, y breve, en dos instrumentos, para todas las sciencias. Recopilada del Arte magna, y Arbor scientiae, del Doctor Raimundo Lulio* (1584), destinada a la enseñanza en la Academia. "Habiendo Vuestra Majestad en sus felicísimos días –afirma en la dedicatoria– hecho una merced tan señalada en establecer en esta su Corte una Academia donde se leen todas las Matemáticas y Filosofía, poniendo para ello maestros tan eminentes y de tanta erudición, y experiencia, púselo en nuestra lengua castellana por ser la voluntad de Vuestra Majestad que en Vuestra Academia se lean todas las ciencias en esta lengua, para que tanto bien sea a todos más fácilmente aprehendido y comunicado".

Aprobada su fundación a finales de 1582, la Academia comenzó a funcionar en octubre del año siguiente en un edificio propio cercano al alcázar real. Durante casi medio siglo se enseñaron en ella materias de carácter teórico, principalmente matemáticas *sensu stricto*, cosmografía y geografía, mecánica según "los tratados de Arquímedes" y también doctrina luliana. No obstante, desde el primer momento se atendieron con especial cuidado las enseñanzas de tipo técnico, en especial las del arte de navegar, arquitectura e ingeniería militar.

Asistieron a las lecciones algunos nobles de gran influencia en la corte, aunque la mayoría de los alumnos pertenecían al estamento medio. Entre los que cursaron estudios en la Academia se encuentran algunas figuras científicas, como el matemático Luis Carducho o el tratadista de arte militar Bernardino de Mendoza, y también personalidades que luego serían célebres por otros motivos, como Lope de Vega. En contraste con la enseñanza universitaria, las clases se daban en castellano y tenían a menudo carácter práctico, para lo que se contaba con abundantes instrumentos.

La Academia no influyó seriamente en la autonomía social del cultivo de las matemáticas *sensu stricto*. Lo único que puede afirmarse es que reforzó la tendencia que puede personificarse en algunas figuras de mediados de la centuria consagradas a la disciplina, como el valenciano Marco Aurel, el andaluz Juan Pérez de Moya y el catalán Antich Rocha, sobre todo porque, a diferencia de las universidades, el idioma utilizado tanto en las clases como en las publicaciones de la Academia era el castellano. La expresa voluntad de Felipe II en ese sentido había sido alentada por el lulista Pedro de Guevara y por Pedro Simón Abril y favoreció un acercamiento a las matemáticas "especulativas" de estilo muy distinto al latino de las facultades de artes.

En dicho acercamiento resulta evidente la vigencia de los supuestos del humanismo, aunque asumidos de una forma mucho más ambiciosa que la propia de los manuales universitarios. Como había sucedido en Italia y más tarde en Alemania, Francia e Inglaterra, la manifestación más visible de esta vigencia fue la traducción de la obra de Euclides a la lengua vulgar. Recordemos que la primera había sido la italia-



LA
PERSPECTIVA,
Y ESPECVLARIA DE
Euclides. Traduzidas en vulgar Caſtellano, y dirigidas a la S.C.R.M. del Rey don Phelippe nueſtro Señor. Por Pedro Ambroſio Onderiz ſu criado.

EN MADRID.
En caſa de la viuda de Alonſo Gomez.
Año. M.D.LXXXV.

Portada de la primera obra impresa por la Academia de Matemáticas. La traducción al castellano de textos clásicos correspondía al nuevo acercamiento a las matemáticas puras promovido por la Academia frente al tradicional de las universidades, cuyo idioma era el latín

na (1543), realizada por el propio Niccolò Tartaglia, seguida de la alemana (1562), la francesa (1564) y la inglesa (1570). Es muy significativo que la primera versión castellana (1576) se debiera a Rodrigo Zamorano, catedrático de la Casa de Contratación, otra institución de carácter técnico que no utilizaba el latín. En el programa de publicaciones de la Academia de Matemáticas esta tarea estuvo en primer plano. A pesar de la preferencia por las cuestiones técnicas, la primera obra impresa fue *La perspectiva y especularia de Euclides. Traducidas en vulgar castellano* (1585), de Pedro Ambrosio Ondériz, y Juan Cedillo Díaz dejó manuscrito el texto de *Los seis libros primeros de la Geometría de Euclides*, traducidos, según consta en una carta introductoria, por orden del rey. Años más tarde, un matemático formado en la Academia, Luis Carducho, publicaría otra versión (1637).

En astronomía, la Academia de Matemáticas fue, junto a la Casa de la Contratación sevillana, el núcleo español más importante de lo que Víctor Navarro ha llamado "utilización pragmática de la obra de Copérnico". El interés hacia ella aparece ya en la actividad del mismo Juan de Herrera. El célebre arquitecto dominaba el latín y poseía en su biblioteca dos ejemplares del *De revolutionibus orbium coelestium*, probablemente de las ediciones de 1543 y 1566, como los existentes en la biblioteca del Escorial. A pesar de ello, en una carta que escribió en 1584 al embajador español en Venecia, decía: "Si el Copérnico se hubiera traducido en vulgar, se me envíe uno". Vernet ha hecho notar que esta petición sugiere el deseo de hacer accesible el tratado a los estudiantes, lo que resulta coherente con el uso del idioma vulgar en la enseñanza de la Academia.

El arte de navegar fue una de las áreas mejor atendidas por la Academia de Matemáticas. Relacionado con ella estuvo Andrés García de Céspedes, que había sido piloto mayor de la Casa de la Contratación y luego ocupó el puesto de cosmógrafo del Consejo de Indias, en la Corte. En su *Regimiento de navegación* (1606) incluyó una tabla para la "longitud y latitud de algunas estrellas fijas... según las observaciones de Tycho Brahe, junto con otros lugares, según el cálculo del Rey Don Alfonso y Copérnico" y otras para "el lugar del Sol y de la Luna... según las observaciones de Tycho Brahe y el cálculo del Rey Don Alfonso y de Copérnico". Dejó también unas *Teóricas* ma-

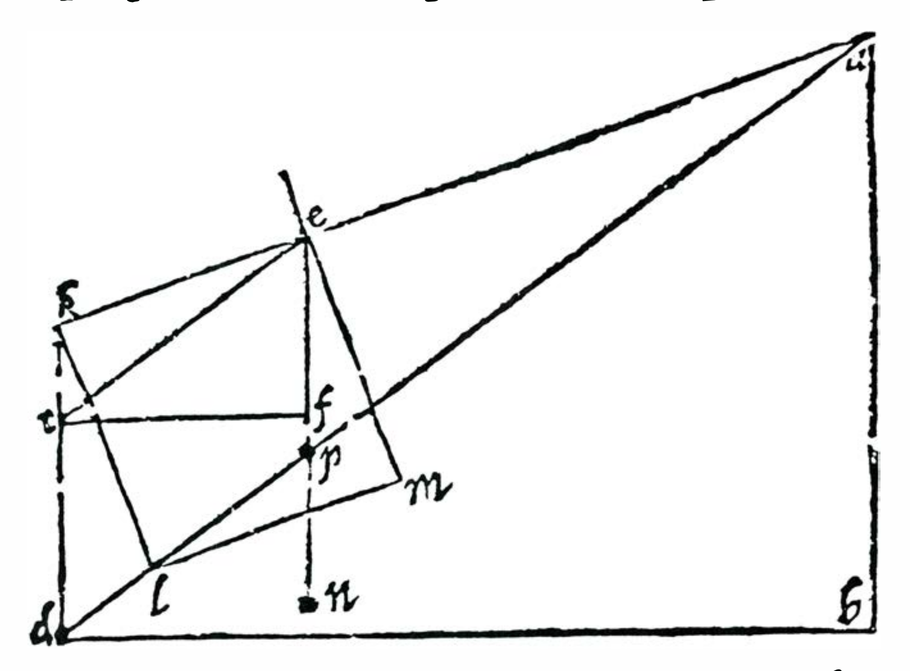
nuscritas, cuya primera parte está expuesta "según la doctrina de Copérnico", mientras que en la segunda "se declara, según nuestras observaciones, las causas por qué van errados los movimientos del Sol y Luna, así en Copérnico como en el Rey Don Alfonso". Anterior fue el *Regimiento nautico* que Juan Bautista Labaña publicó en Lisboa en idioma portugués. Quedaron manuscritas las obras sobre la materia de Juan Cedillo Díaz, otro profesor de la Academia. De ellas se conservan en la Biblioteca Nacional un *Tratado de la carta de marear*, otro sobre "el nordestear y noroestear de las agujas", dos relacionadas con la observación astronómica, así como una traducción castellana del *De arte atque ratione navigandi*, de Nunes, autor que ejerció una gran influencia sobre Cedillo.

Varias de las figuras citadas, en especial Cedillo y García de Céspedes, corresponden al tipo de técnico que ha sido llamado "científico-ingeniero", el más importante de la época. Cedillo escribió un tratado "para encaminar el agua por las cauzas y canchiles o molinos, fuentes y riberas", en el que presenta un instrumento de su invención, llamado *corobates*, "con que se conoce y examina, dados dos o tres o más puntos en la superficie de la tierra, cuál de ellos está más desviado o más cerca del centro". Ideó también el *trinormo*, aparato para medir las inclinaciones, alturas y distancias, cuya construcción y aplicaciones "para los ingenieros y agrimensores, marineros, arquitectos y artilleros" describió en otro texto manuscrito que se conserva, como el anterior, en la Biblioteca Nacional. García de Céspedes, por su parte, publicó en 1606 un *Libro de instrumentos nuevos* que incluye tres tratados. El primero es un resumen de geometría práctica, con las nociones necesarias para la medición de alturas y distancias. El segundo, un interesante manual "de conducir aguas", que demuestra que su autor tenía una amplia experiencia práctica en ingeniería hidráulica y no una mera noticia libresca sobre el tema. No obstante, subraya la superior eficacia de la técnica basada en conocimientos científicos frente a la práctica meramente empírica, aduciendo ejemplos de los fracasos y de las pérdidas de tiempo y de dinero producidas por prácticos sin preparación teórica. La tercera parte de su libro es una breve "questión de artillería", consagrada principalmente a la balística. García de Céspedes dejó, además, manuscrito un *Libro de mechanicas donde se pone de razon de todas las machinas*.

También fueron profesores de la Academia de Matemáticas notables técnicos militares. En artillería destacó Julián Firrufino, ingeniero italiano que antes había dirigido la "fundición" de Málaga y enseñado la disciplina en Sevilla y en la escuela militar de Burgos, así como su hijo Julio César Firrufino, quien publicó varios tratados sobre el tema a partir de 1624. En fortificación, la máxima figura fue Cristóbal de Rojas, de cuya obra dimos noticia hace poco en esta misma sección.

Geometria. 10

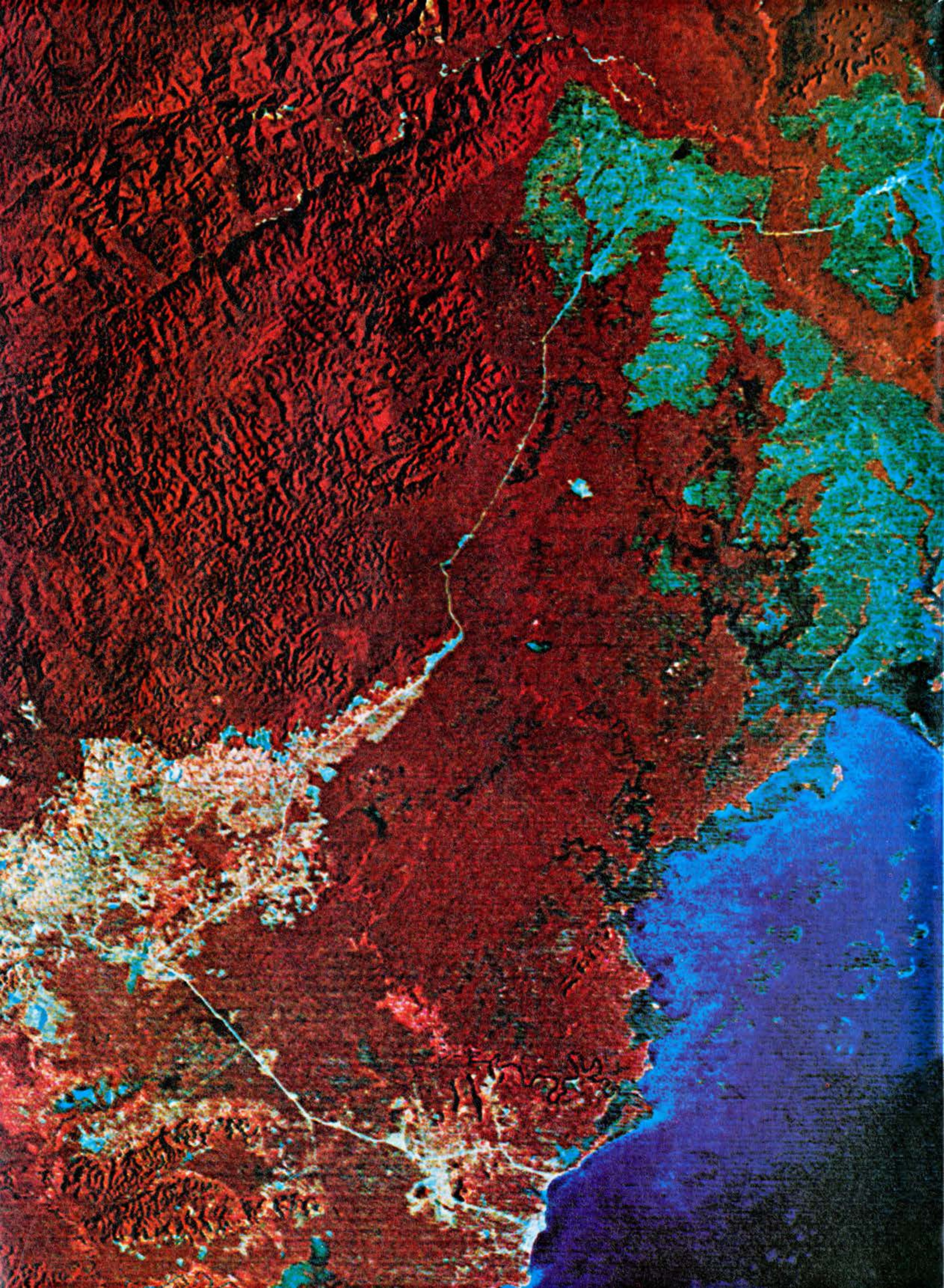
cupieren en el lado, c e, tantas vezes cabrà K d, en el rayo viſual, d a. Para ſaber la diſtancia, d b, y la altura, b a, ſe ponga vn hilo del punto, c, que venga perpendicular ſobre el perpendiculo, e n, que caera en el pũto, f.



Pues ſabiendo los puntos que tiene, c f, de los que el lado del quadrado tiene 100. las vezes que cupiere, K c, en, e f, tantas cabrà, K d, en, d b: y ſabiendo los puntos que tiene, f e, ſe ſabrà quantas vezes cabe, K c, en, f e, que tantas vezes cabrà, K d, en, b a. Pues queda ſabido deſta operaciõ la diſtan-

C 2 cia

Página de la obra de Andrés García de Céspedes titulada **Libro de instrumentos nuevos de Geometría muy necesarios para medir distancias y alturas... Demas desto se ponen otros tratados, como es uno de conduzir aguas, y otro una question de artilleria...** *(Madrid, Juan de la Cuesta, 1606). La Academia madrileña desarrolló especialmente las aplicaciones de las matemáticas a las principales áreas de actividad técnica de la época*



Dióxido de carbono y clima mundial

La quema de combustibles fósiles y la tala de bosques incrementan la cantidad de dióxido de carbono que recibe la atmósfera. Es probable que el resultado sea un aumento global de la temperatura

Roger Revelle

El "problema del dióxido de carbono", que ha sido objeto de gran preocupación en los últimos años, es en realidad una combinación de tres problemas. El primero es el de saber cuánto dióxido de carbono se añadirá a la atmósfera en los próximos años, y a qué velocidad, como consecuencia de la quema de combustibles fósiles y la tala de bosques. Estas actividades humanas han incrementado ya el dióxido de carbono atmosférico en aproximadamente un 15 por ciento en el último siglo. El segundo problema es si el aumento del dióxido de carbono producirá una subida importante en la temperatura media y otros cambios en el clima de diversas regiones. Los modelos matemáticos del clima terrestre indican que la respuesta es probablemente afirmativa, pero todavía no se ha detectado una señal climática inequívoca. El tercer problema es si los posibles cambios climáticos y otros efectos de la creciente concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tendrían consecuencias importantes para las sociedades humanas. También aquí la respuesta es probablemente afirmativa, con la matización de que las consecuencias serían complicadas: algunas regiones y algunas sociedades humanas se beneficiarían, mientras que otras saldrían perjudicadas.

El dióxido de carbono altera el balance de calor de la Tierra al actuar como pantalla en un solo sentido. Es transparente para la radiación a las longitudes de onda visibles, donde está contenida la mayor parte de la energía de la luz del Sol, por lo que éste puede calentar los océanos y los continentes. Por otra parte, las moléculas de dióxido de carbono en la atmósfera absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja, de mayor longitud de onda, que a su vez irradia la superficie de la Tierra y que de otra manera se perdería en el espacio. Este es el llamado "efecto de invernadero". Si no hubiese nada de dióxido de carbono en la atmósfera, el calor escaparía de la Tierra mucho más fácilmente. La temperatura en superficie necesaria para que hubiese equilibrio entre la radiación incidente y la emitida sería más baja, y los océanos podrían ser una masa sólida de hielo.

A lo largo de las épocas geológicas, los volcanes han emitido enormes cantidades de dióxido de carbono. Casi todo él se ha transformado químicamente en carbonatos cálcico y magnésico o en materia orgánica, y ha sido enterrado en los sedimentos marinos. La cantidad de carbono contenida en los carbonatos sedimentarios se estima en 50 millones de gigatoneladas (una gigatonelada vale mil millones de toneladas) y la cantidad en la masa sedimentaria orgánica se estima en unos 20 millones de gigatoneladas. El total, 70 millones de gigatoneladas, es casi 2000 veces mayor que todo el carbono de la atmósfera, los océanos y la biosfera, que se cifra en unas 42.000 gigatoneladas. La componente atmosférica misma es una pequeña fracción de esta última cantidad: aproximadamente unas 700 gigatoneladas. El hecho de que la mayor parte del carbono existente en las capas superficiales de la Tierra haya pasado por la atmósfera y haya sido enterrado en los sedimentos explica la moderada intensidad del efecto de invernadero en la atmósfera terrestre. En Venus, que no tiene océanos, la atmósfera está constituida principalmente por dióxido de carbono; el efecto de invernadero es allí mucho más fuerte; la temperatura en superficie alcanza los 400 grados Celsius. En Marte, donde la atmósfera es muy tenue, el efecto es muy débil y la temperatura en superficie es de −50 grados Celsius.

Hace cerca de cien años, el químico sueco Svante Arrhenius y el geólogo americano Thomas C. Chamberlin propusieron independientemente la hipótesis de que las variaciones en la abundancia de dióxido de carbono en la atmósfera afectarían a la temperatura en la superficie de la Tierra. Arrhenius estimó que al duplicarse la concentración de aquel gas se produciría un aumento global de temperatura de aproximadamente nueve grados Celsius. En 1939, G.S. Callendar observó que el calentamiento global observado a lo largo de los 60 años anteriores podría haber sido producido por un aumento en la cantidad de dióxido de carbono atmosférico como consecuencia de la combustión de materias fósiles. Gilbert N. Plass razonó en una línea similar a principios del decenio de 1950.

Ninguna de las dos propuestas fue tomada muy en serio por los otros científicos. Una de las razones era que, aproximadamente por la misma época, la temperatura media global cesó de subir; a lo largo de las dos décadas siguientes llegó incluso a disminuir ligeramente. Una segunda razón era que muchos científicos admitían que casi todo el dióxido de carbono producido in-

LA DESFORESTACION es evidente en esta fotografía del Distrito de Toledo de Bélice (antes Honduras Británica) tomadas por el Landsat que figura en la página opuesta. En el sistema mixto infrarrojo-falso color de reproducción de imágenes del Landsat, las zonas rojas oscuras son bosques y las regiones azulverdosas y azules (aparte del golfo de Honduras en la parte inferior derecha) representan bosques recientemente talados. Las regiones en rosa brillante indican vegetación regenerándose, bien tierra de cultivo recuperada o nuevo crecimiento de bosque en pequeña escala. El área talada es aproximadamente de 218 kilómetros cuadrados, lo que equivale a un 1 por ciento del área del país. Talas semejantes, en la mayor parte de los casos para extender las regiones agrícolas, se han llevado a cabo en Bangladesh, Brasil, Filipinas, Tailandia, Venezuela y otros países. La desaparición de los bosques añade grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, porque los árboles incorporan de 10 a 20 por ciento más carbono por unidad de superficie que los cultivos o los pastizales. Los factores parcialmente compensadores son el nuevo crecimiento de los bosques en tierras de cultivo abandonadas y la repoblación forestal deliberada.

dustrialmente sería absorbido por los océanos y por consiguiente eliminado de la atmósfera. El mar contiene unas 60 veces más dióxido de carbono que la atmósfera, y se creía que esta proporción se mantendría. En tercer lugar, las medidas de dióxido de carbono en muestras de aire tomadas en lugares y épocas diferentes variaban tanto, que era imposible determinar si la cantidad total en la atmósfera estaba aumentando o disminuyendo.

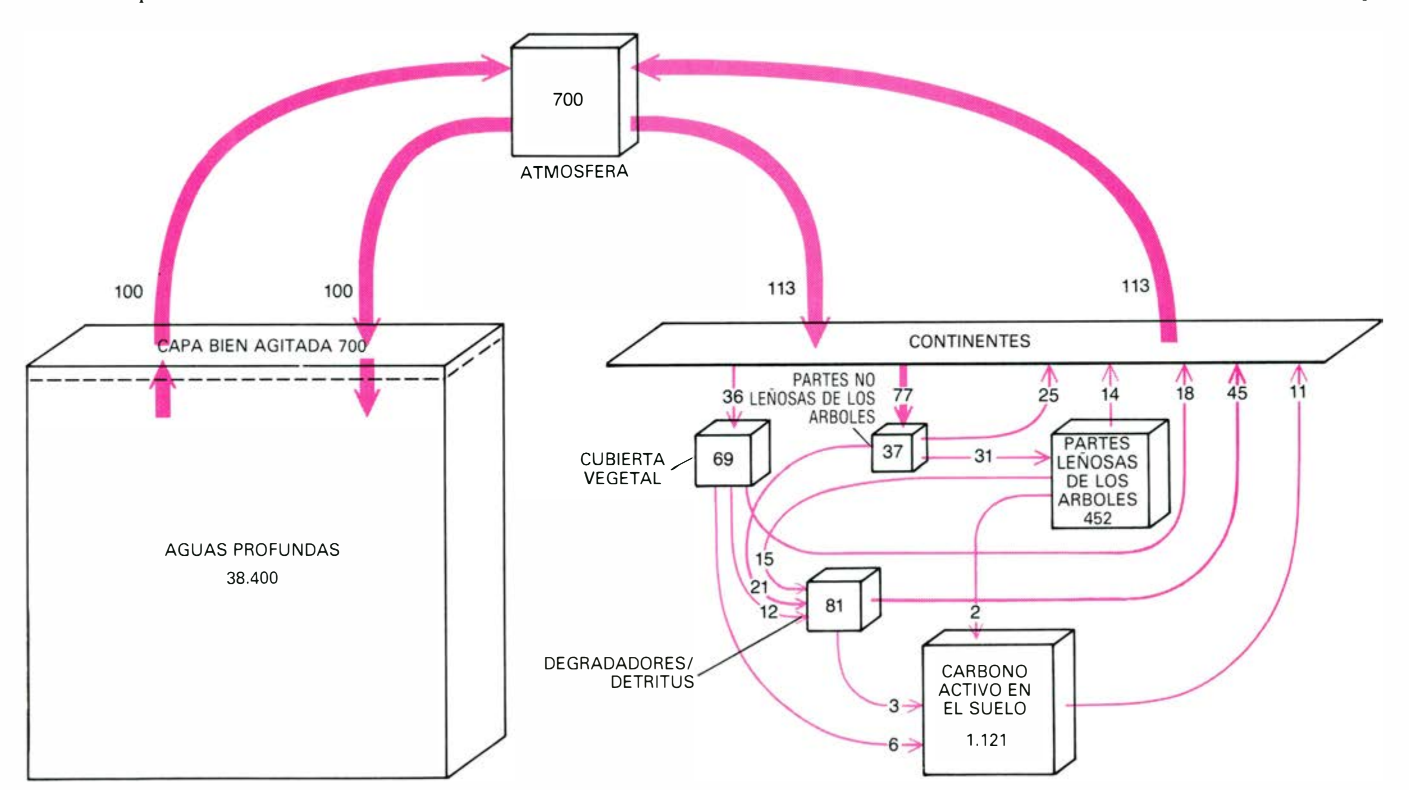
La mayor parte del dióxido de carbono en los océanos está en forma de iones carbonato y bicarbonato, y solamente un poco es dióxido de carbono "libre" disuelto. En 1957, Hans Seuss y el autor mostraron que un cambio relativamente pequeño en la cantidad de dióxido de carbono libre disuelto en el agua del mar corresponde a una variación comparativamente grande de la presión parcial del dióxido de carbono a la que océanos y atmósfera están en equilibrio. Se deducía de este descubrimiento que la velocidad a la que los océanos del planeta podían absorber gas era mucho menor de lo que se había creído.

Los gases se intercambian con facilidad entre la atmósfera y el océano solamente en una capa superficial bien mezclada de unos 80 metros de profundidad en promedio. Si el dióxido de carbono absorbido está confinado a esta capa, una variación dada en la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera modificaría el contenido en el agua superficial solamente en una novena parte de aquella variación. A esta relación 9:1 la llamamos "factor de amortiguación", y demostramos que aumenta al aumentar el dióxido de carbono atmosférico. La difusión hacia abajo, la advección y la convección entre la capa superficial bien mezclada y el agua más profunda aumentarían la cantidad de dióxido de carbono absorbida por el océano y por tanto reducirían la cantidad que queda en la atmósfera, pero creíamos que esos procesos eran relativamente lentos. En consecuencia, parecía probable que una gran parte del dióxido de carbono liberado en la combustión de carbón, petróleo y gas natural permaneciese en la atmósfera durante un considerable período de tiempo, posiblemente con profundos efectos sobre el clima terrestre.

El hombre estaba llevando a cabo sin darse cuenta un gran experimento geofísico. Si se obtuvieran de él los datos adecuados, podría conducir a un nuevo nivel de comprensión de la atmósfera y de los océanos. También podría, sin embargo, originar variaciones climáticas que fuesen seriamente perturbadoras.

En el programa del Año Geofísico Internacional de 1957-58 se incorporaron proyectos para la medida del dióxido de carbono atmosférico. Parte del trabajo se asignó a la Institución Scripps de Oceanografía, que encargó a Charles David Keeling la realización de las medidas. Este investigador instaló analizadores de gas de gran precisión para la medida continua del dióxido de carbono en dos puntos: cerca de la cima de Mauna Loa, en Hawai, y en la estación del Polo Sur del Programa Antártico de los Estados Unidos. Los lugares se escogieron porque estaban libres de contaminación local y era de suponer que proporcionarían aire bien mezclado para las muestras. Los datos de esos dos puntos se suplementaron mediante medidas de muestras de aire recogidas por aviones sobre los océanos.

Los gráficos que se acompañan [*veánse las ilustraciones de las páginas 14 y 15*] muestran los resultados obtenidos por Keeling y sus colaboradores, de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica, en dos decenios de medidas. En ambas estaciones se evidencia un ciclo anual de concentración de dióxido de carbono, ciclo que refleja las cambiantes actividades estacionales de las plantas verdes. Durante la estación de crecimiento hay



EL CICLO DEL CARBONO se muestra en función de la cantidad de carbono almacenada en diversos depósitos y el intercambio anual entre los depósitos. Estos intercambios están indicados por las flechas. Las cifras están expresadas en gigatoneladas, o miles de millones de toneladas. En los cubos que representan el carbono almacenado, las cifras muestran el contenido actual de carbono del depósito. Las cifras asociadas a las flechas dan el flujo de carbono de equilibrio en gigatoneladas por año que tendría lugar sin intervención humana. La acción del hombre, ejemplificada en el gasto de combustibles fósiles y tala de bosques, está incrementando la cantidad de carbono (en forma de dióxido de carbono) en la atmósfera. El aumento podría conducir a un calentamiento global porque las moléculas de dióxido de carbono absorben y reemiten parte de la radiación infrarroja procedente de la superficie terrestre. Las estimas de carbono almacenado y flujos de carbono desde la biosfera terrestre fueron calculadas por Jerry Olson, del Laboratorio de Oak Ridge.

una extracción neta de carbono de la atmósfera por las plantas mediante la fotosíntesis; en las otras épocas, se devuelve dióxido de carbono a la atmósfera por oxidación de los tejidos de las plantas. Cuando se elimina la variación estacional, los registros muestran un crecimiento aproximadamente exponencial en ambas estaciones de medida. Cuando las medidas se iniciaron, la concentración subía a razón de aproximadamente 0,7 partes por millón por año: hacia finales del decenio de 1970, la velocidad había alcanzado 1,4 partes por millón y año.

Keeling y su colega Robert Bacastow llegaron a la conclusión de que la concentración media en Mauna Loa había aumentado desde 315,8 partes por millón, a principios de 1959, hasta 334,6 en enero de 1978, lo que constituía un aumento del 6 por ciento. La estación del Polo Sur llevaba retraso con respecto a Mauna Loa a causa del tiempo necesario para realizar la mezcla a través del Ecuador, de modo que el aumento observado en el Polo Sur era ligeramente inferior. El aumento de unas 19 partes por millón en Mauna Loa corresponde a la adición de 40 gigatoneladas de carbono a la atmósfera en esos 19 años.

Ralph M. Rotty, del Instituto para el Análisis de la Energía en Oak Ridge, Tennessee, ha compilado y evaluado los datos de las Naciones Unidas sobre la producción de carbón, petróleo y gas natural a lo largo de este período. Ha llegado a la conclusión de que el total de dióxido de carbono producido (incluyendo una pequeña contribución procedente de la fabricación de cemento) corresponde a unas 70 gigatoneladas de carbono, aumentando desde 2,4 gigatoneladas por año en 1959 hasta 5 gigatoneladas por año en 1977. Esta cantidad representa 1,75 veces la cantidad de carbono medida que se ha añadido a la atmósfera.

Rotty ha calculado también que el dióxido de carbono procedente de combustibles fósiles producido entre 1860 y 1958 corresponde a 76,5 gigatoneladas de carbono. Aplicando la misma relación de producción al incremento atmosférico, el carbono añadido a la atmósfera entre 1860 y 1977 sería de 84 gigatoneladas, o 40 partes por millón de dióxido de carbono. La estima es sin embargo incierta, porque debe haber habido un importante ingreso de dióxido de carbono durante el siglo que comienza en 1860 como consecuencia de la tala de cientos de millones de hectáreas de bosque para aumentar la superficie de las tierras arables. Hasta hace pocos decenios, tal expansión de la tierra cultivable era necesaria para alimentar a la creciente población del mundo; la cosecha recogida por hectárea no aumentó gran cosa hasta después de la Segunda Guerra Mundial.

Las convincentes pruebas de que la concentración de dióxido de carbono atmosférico está aumentando exponencialmente han dado por resultado un crecimiento todavía más rápido de las mediciones científicas y los estudios teóricos acerca del problema del dióxido de carbono. Ha habido una plétora de conferencias y congresos, y se han realizado medidas de dióxido de carbono atmosférico en muchos lugares, que se extienden en latitud desde Barrow en Alaska hasta Halley Bay en la Antártida; en condiciones de ambiente normal, desde Europa Occidental hasta la estación meteorológica PAPA en la parte central del Pacífico Norte y la Isla Amsterdam en el Sur del Océano Indico; y en el tiempo, desde el presente hasta la época más fría del último período glacial, hace aproximadamente 18.000 años.

Ese conjunto de medidas han hecho posible la construcción de un corte vertical que muestra la variación con la latitud de la concentración media anual de dióxido de carbono en la atmósfera. Los valores más altos resultan encontrarse al Norte de 40 grados de latitud en el hemisferio Norte, donde el consumo de combustibles fósiles y las variaciones estacionales en la productividad de las plantas son máximos. Los valores más bajos se presentan en el hemisferio Sur, donde el consumo de combustibles fósiles y la actividad de las plantas terrestres son relativamente pequeños.

Para que la Tierra se mantenga a temperatura constante, las emisiones infrarrojas del planeta deben compensar la radiación solar absorbida. Bajo las condiciones actuales, el balance se alcanza a una temperatura radiante en la atmósfera terrestre de −18 grados Celsius y a una altura de cinco a seis kilómetros. Por debajo de este nivel, la temperatura aumenta en aproximadamente seis grados por kilómetro al acercarse a la superficie terrestre, donde la temperatura media es de 15 grados. Si la opacidad de la atmósfera a la radiación infrarroja aumenta, el nivel radiante de equilibrio y la temperatura de la superficie y de la baja atmósfera deben subir hasta que las emisiones del planeta y la radiación solar absorbida vuelvan a ser iguales. Un aumento en la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera tiende a cerrar la "ventana" atmosférica infrarroja, porque hay más moléculas de dióxido de carbono para absorber la radiación.

El aumento medio de la temperatura en superficie se puede calcular con ayuda de un modelo matemático que predice la temperatura en función de la altura sobre la superficie. James E. Hansen y sus colegas, de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, han empleado tal modelo para examinar los principales procesos que podrían incidir en la temperatura cuando se añade dióxido de carbono a la atmósfera. Supusieron que tanto la humedad relativa como la temperatura en la cima de las nubes se mantenían constantes y que la temperatura disminuía con la altura a razón de 6,5 grados Celsius por kilómetro. Bajo esas condiciones hallaron que el duplicar la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera haría subir la temperatura global media en superficie en 2,8 grados C, con un factor estimado de incertidumbre de dos.

El vapor de agua en la atmósfera es también un eficaz absorbente de radiación en las longitudes de onda infrarrojas. Parte de la subida de temperatura calculada proviene de la hipótesis de humedad relativa constante; como el aire caliente puede contener más vapor de agua que el aire frío, mantener la humedad relativa constante requiere que la cantidad de vapor de agua en la atmósfera aumente con la temperatura. Por consiguiente, se absorberá y reemitirá nuevamente a la Tierra más radiación infrarroja, creando una realimentación positiva.

Si la temperatura media de la cima de las nubes no cambia, la cantidad de radiación infrarroja que emitirán hacia el espacio permanecerá constante. Sin embargo, las nubes se mueven hacia un nivel más alto a causa del calentamiento de la baja atmósfera. Si la tasa de variación de la temperatura entre la superficie y la cima de las nubes permanece constante, el resultado es más calentamiento todavía, dando lugar a otro efecto de realimentación positiva.

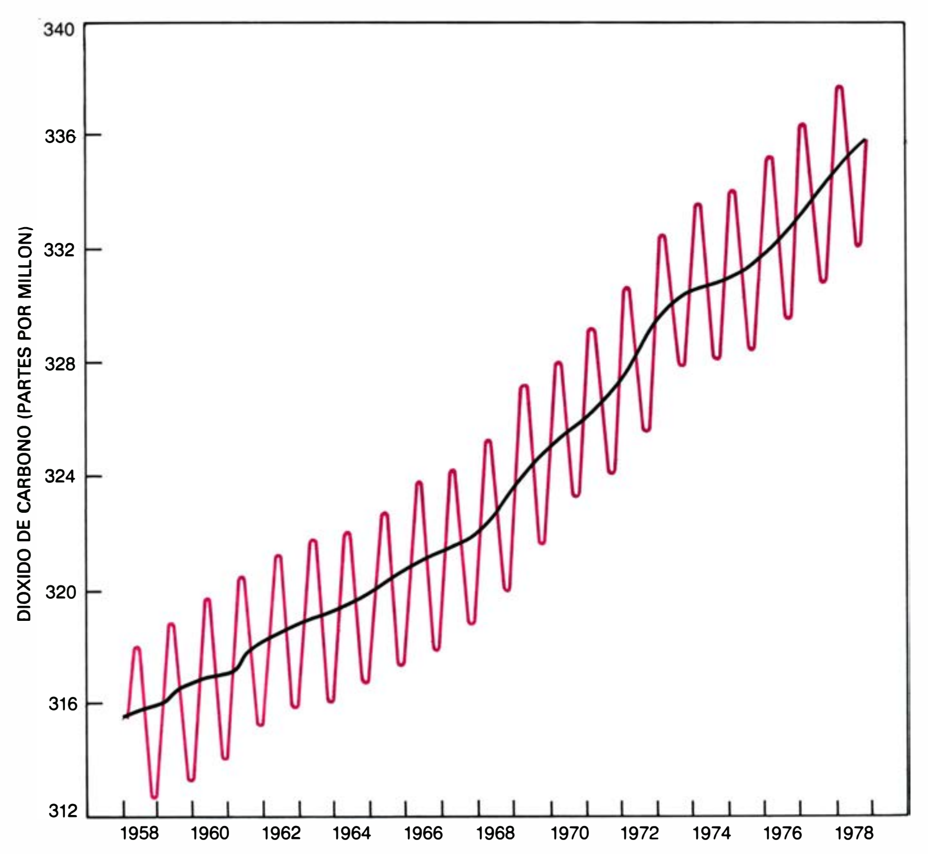
Puede suponerse que el calentamiento de la superficie funda parte del hielo y la nieve, reduciendo el albedo o reflectividad de la Tierra. Se absorbería entonces más radiación solar, lo que conduciría a un nuevo incremento de temperatura. El resultado sería un nuevo efecto de realimentación positiva de magnitud aproximadamente igual al debido a la hipótesis de temperatura fija en la cima de las nubes. El futuro calentamiento cerca de la superficie terrestre debido al aumento del dióxido de carbono se intensificaría en forma

importante, quizás hasta un 50 por ciento, si la concentración de otros gases absorbentes de radiación infrarroja, como son el óxido nitroso, el metano y los clorofluorocarbonos, aumentase como es de esperar en los próximos 50 o 100 años.

Hansen y sus colaboradores examinaron también los archivos de la temperatura media anual del globo entre 1880 y 1980. Hallaron que la temperatura subió 0,5 grados entre 1885 y 1940, con un ligero enfriamiento después. En los archivos basados exclusivamente en datos tomados en el hemisferio Norte al Norte del trópico, el reciente enfriamiento constituye una tendencia destacada, pero el grupo de Hansen halló que la temperatura media global en 1980 era casi tan alta como en 1940. Durante el período de 1880 a 1980 la temperatura media global subió aproximadamente 0,4 grados, variación en concordancia básica con su cálculo de que el aumento del dióxido de carbono de la atmósfera había sido de 43 partes por millón en el mismo período.

La correlación entre el nivel de dióxido de carbono y la temperatura no es exacta, sin embargo; ello indica que otros factores deben haber afectado a la temperatura global. Cuando el grupo de Hansen tomó en consideración la absorción de calor por los océanos y las variaciones en la cantidad de aerosoles volcánicos, el ajuste mejoró considerablemente. Se obtiene todavía mejor concordancia cuando se incluye también una variabilidad hipotética del 0,2 por ciento en la luminosidad del Sol.

La concordancia general entre las variaciones modelada y observada de la temperatura sugiere firmemente que el dióxido de carbono y los aerosoles volcánicos son responsables de gran parte de la variación global de temperatura en los últimos 100 años. Debe decirse, sin embargo, que hasta ahora la tendencia al calentamiento no ha sobrepasado el "nivel de ruido" de las fluctuaciones anuales de la temperatura, que alcanza 0,2 grados Celsius por encima o por debajo del promedio anual. La confianza en la hipótesis del dióxido de carbono adquiriría una mayor solidez si se hiciera evidente una tendencia al calentamiento que excediera el nivel de ruido. Casi todas las estimas razonables de la cantidad de combustible fósil que se consumirá en los próximos años sugieren que si el dióxido de carbono está en realidad alterando el clima, hacia el decenio de 1990 aparecerá una clara tendencia hacia el calentamiento.



LA CRECIENTE CONCENTRACION de dióxido de carbono en la atmósfera en Mauna Loa, en Hawai, es evidente en las medidas continuas hechas por Charles David Keeling de la Institución Scripps de Oceanografía y por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica. La variación estacional *(en color)* se produce porque la actividad fotosintética de las plantas durante la época de crecimiento extrae dióxido de carbono del aire y lo devuelve después por oxidación de los tejidos de las plantas; compárese ésta con la curva en negro, que muestra la variación con el efecto estacional eliminado artificialmente.

Syukuro Manabe, Richard T. Wetherald y R. Stouffer, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos en la Universidad de Princeton, han elaborado un modelo matemático para explorar la distribución geográfica de los probables cambios climáticos resultantes de la duplicación o cuadruplicación del dióxido de carbono atmosférico. El modelo muestra una respuesta climática marcadamente diferente a distintas latitudes. Con la duplicación del dióxido de carbono, el aumento en la temperatura media es de menos de 2 grados Celsius en los trópicos, pero es de tres grados Celsius a la latitud de 35 grados Norte (aproximadamente la latitud de Los Angeles y Tokio). A 50 grados Norte (cerca de París y de Vancouver), la temperatura aumenta en 4 grados Celsius y a 76 grados Norte (bastante por encima del Círculo Polar Artico), el aumento es de siete grados Celsius. El aumento previsto a las altas latitudes boreales es mucho mayor entre octubre y mayo que durante el verano, reduciendo así la amplitud de las variaciones estacionales de temperatura sobre las tierras boreales.

El modelo muestra también un fuerte aumento en las intensidades de precipitación y escorrentía a latitudes boreales altas. Mas, entre 35 y 45 grados Norte se acorta notablemente la diferencia entre precipitación y evaporación, lo que daría por resultado un decrecimiento importante en la escorrentía. Para una concentración doble de dióxido de carbono en la atmósfera, los cambios climáticos pronosticados por el modelo son mayores que ninguno de los experimentados desde el final del último período glacial, hace aproximadamente 12.000 años. Las temperaturas globales podrían ser más altas que las que el hombre civilizado ha experimentado nunca. Las altas temperaturas persistirían durante cientos de años hasta que la lenta absorción por los océanos eliminase el exceso de dióxido de carbono de la atmósfera.

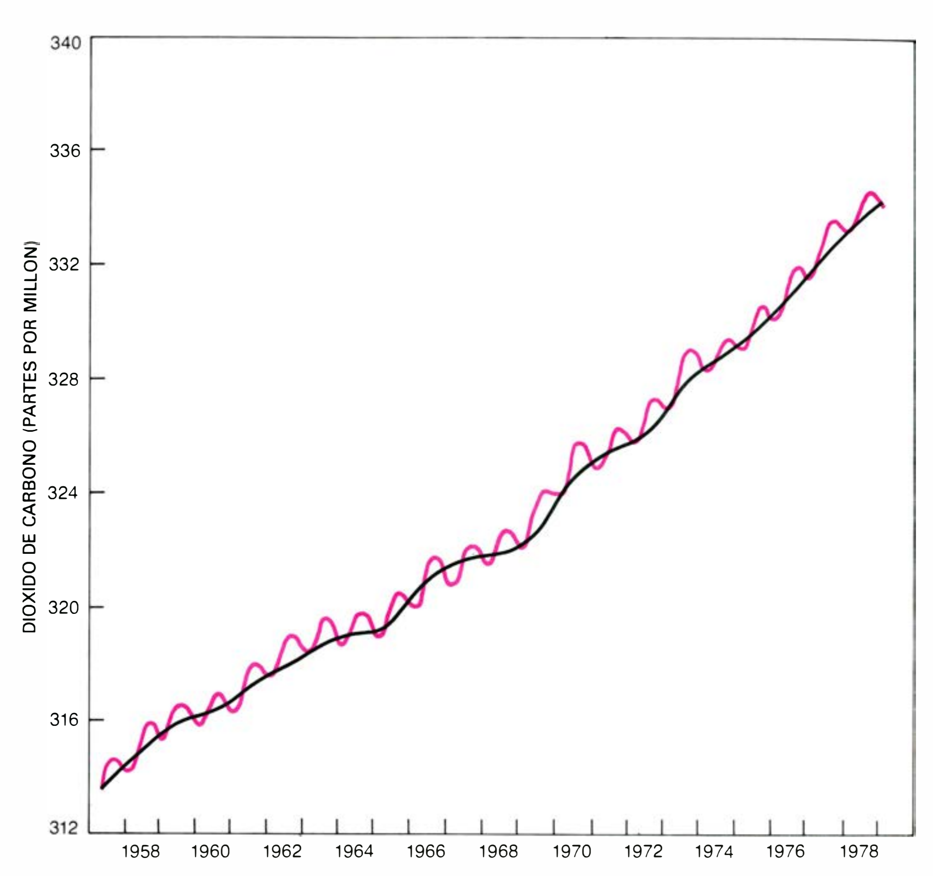
Los modelos del tipo empleado por Manabe y sus colegas llevan consigo muchas incertidumbres. Por ejemplo, la interacción entre atmósfera y océanos del modelo sólo es parcialmente realista, de modo que no puede representar el transporte de calor de bajas a altas latitudes por las corrientes oceánicas, o el intercambio de calor entre la capa oceánica superficial mezclada y las aguas más profundas. Otra incertidumbre proviene de la dificultad de predecir la respuesta de las nubes a las cambiantes condiciones climáticas. De manera análoga, es difícil predecir el

efecto de las variaciones en la extensión geográfica de los hielos marinos sobre el intercambio de calor y de vapor de agua entre el mar y la atmósfera. La tosca resolución espacial del modelo enmascara las variaciones regionales en el clima.

Todas esas incertidumbres sugieren que el modelado matemático de los cambios climáticos debería evaluarse y controlarse por estudios de los climas pasados, y particularmente de los últimos períodos cálidos. Recientemente, Hermann Flohn, de la Universidad de Bonn, ha realizado un estudio de esta clase. A partir de sus resultados, ha estimado los cambios en la temperatura media y en la precipitación que serían probables en diversas cintas de latitud si la concentración de dióxido de carbono de la atmósfera aumentara hasta la región de 560 a 680 partes por millón (unas dos veces el nivel de hace un siglo) y si otros gases absorbentes en el infrarrojo incrementaran su presencia.

El análisis hecho por Flohn de los datos históricos sugiere que podrían producirse apreciables disminuciones de la precipitación y aumentos de la temperatura (y, por tanto, de la evaporación) en bandas de latitud centradas en 40 grados Norte y 10 grados Sur. Por otra parte, la precipitación sería mayor entre 10 y 20 grados Norte y en las regiones al Norte de 50 grados Norte y al Sur de 30 grados Sur. Estos cambios podrían tener profundos efectos en la distribución de los recursos mundiales de agua. Por ejemplo, en el sistema del río Colorado de los Estados Unidos, la cuenca de drenaje más importante está aproximadamente a 40 grados Norte. No solamente disminuiría la lluvia en esta zona, sino que también el aumento de temperatura incrementaría la evaporación. En la actualidad se evapora aproximadamente el 85 por ciento de la precipitación, y sólo el 15 por ciento va a parar al río. Con un aumento de varios grados Celsius en la temperatura del aire y un 10 al 15 por ciento de disminución en la precipitación, el caudal medio del Colorado bajaría un 50 por ciento o más. Incluso el caudal actual, regulado por grandes volúmenes de agua almacenados en embalses, es apenas suficiente para satisfacer las demandas de la agricultura de regadío.

En otras partes del mundo es probable que se produjeran importantes cambios en las disponibilidades de agua superficial y subterránea. En Africa Septentrional, los caudales medios del Níger, Chari, Senegal, Volta y Nilo Azul podrían aumentar substancialmente porque sus cuencas recibirían de un 10 a un 20 por ciento más de precipitación, mientras que las temperaturas sólo aumentarían ligeramente. En muchos otros ríos el caudal podría disminuir considerablemente: el Hwang Ho en China, el Amu Darya y el Syr Darya en una de la principales regiones agrícolas de la URSS, el sistema Tigris-Eufrates en Turquía, Siria e Irak, el Zambeze en Zimbabwe y Zambia y el São Francisco en Brasil. Alguna menor escorrentía y almacenamiento subterráneo se podría esperar en el río Congo en Africa, el Ródano y el Po en Europa Occidental, el Danubio en Europa Oriental, el Yangtze en China y el río Grande en los Estados Unidos. Muchos de esos ríos constituyen la base de extensos sistemas de regadío altamente productivos, y la reducción prevista de sus caudales podría tener graves consecuencias. Al mismo tiempo, fuertes aumentos en los caudales de los ríos Mekong y Brahmaputra podrían desencadenar inundaciones desastrosas y frecuentes en amplias zonas de Tailandia, Laos, Cambodia, Vietnam, India y Bangladesh.



AUMENTO DEL DIOXIDO DE CARBONO en el Polo Sur: con las variaciones estacionales incluidas *(en color)* y eliminadas *(en negro)*. Las medidas continuas se realizaron bajo la dirección de Keeling.

Los efectos en gran escala del aumento del dióxido de carbono en la atmósfera sobre la agricultura de secano, dependiente de las lluvias, serían complicados y más difíciles de estimar que los efectos sobre la agricultura de regadío. El dióxido de carbono es un nutriente fundamental de las plantas; constituye un componente de la formación de materia orgánica por fotosíntesis. Como han puesto de manifiesto Sylvan H. Wittwer, de la Universidad estatal de Michigan, y Norman J. Rosenberg, de la Universidad de Nebraska en Lincoln, los experimentos, tanto en el invernadero como en el campo, demuestran que una mayor concentración de dióxido de carbono fomenta la fotosíntesis y da lugar a un crecimiento más rápido. A igualdad de otros factores, un mayor contenido de dióxido de carbono conduciría a una mayor producción de cultivos tales como arroz, trigo, alfalfa y soja.

Tal vez de la misma importancia es el hecho de que algunas plantas tienden a cerrar sus estomas, o poros de sus hojas, en un ambiente de alto contenido de dióxido de carbono, con la consiguiente reducción en la transpiración de agua. De aquí que, con lluvia escasa o incierta, el maíz, la caña de azúcar y el sorgo, así como los cultivos arriba mencionados, se verían probablemente menos afectados por la escasez de agua al aumentar el contenido de dióxido de carbono atmosférico. A altas latitudes, las temperaturas más altas inducidas por el dióxido de carbono pueden alargar el período de crecimiento, permitiendo la expansión de zonas de agricultura de secano.

Una posible consecuencia del calentamiento climático que ha sido ampliamente discutida es la desintegración de la barrera de hielo de la Antártida Occidental, que muchos glaciólogos consideran inestable porque gran parte de ella está debajo del nivel del mar. El volumen de hielo por encima del nivel del mar es aproximadamente de dos millones de kilómetros cúbicos. Si todo él se fundiera, el nivel del mar ascendería cinco o seis metros, inundando muchas ciudades costeras y mucha tierra cultivable en Holanda, Bangladesh, las regiones de tierras bajas del Sur de los Estados Unidos y muchos deltas de ríos densamente poblados en todo el mundo. La mitad del estado de Florida quedaría cubierta por los mares.

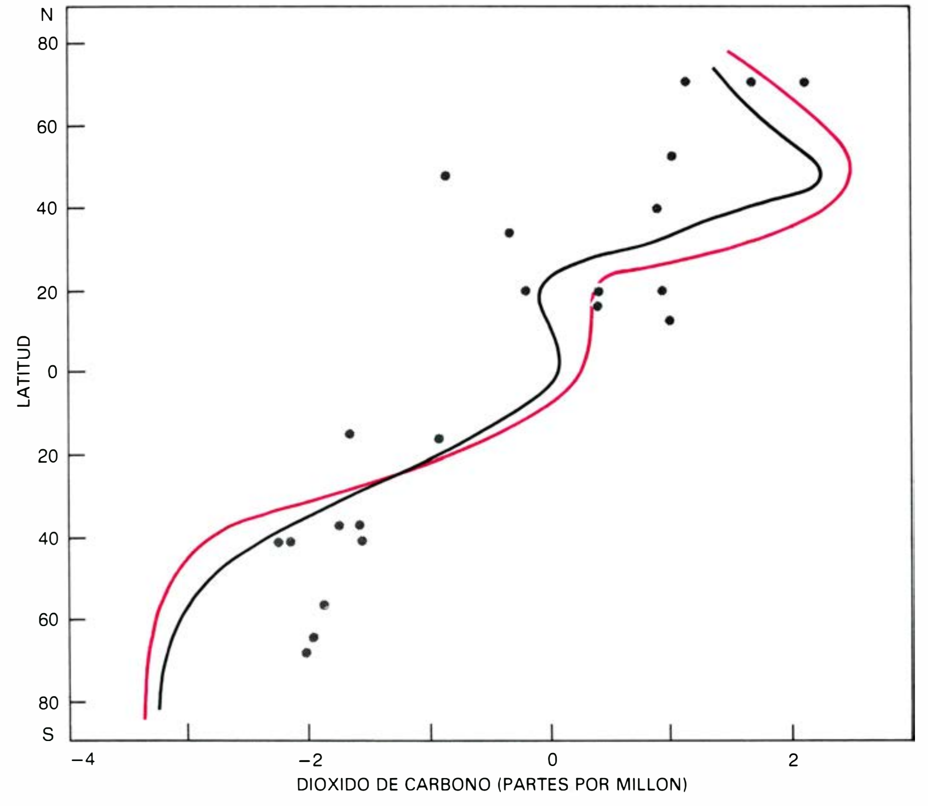
Aun cuando tales cambios en el mapa del globo puedan parecer la consecuencia potencial más dramática del cambio climático, la adaptación social y económica podría no ser muy difícil, al menos en el caso de las ciudades, si los cambios fueran suficientemente lentos. Exceptuando los monumentos históricos, las ciudades se están reconstruyendo constantemente sin precisar el estímulo de los cambios en la forma de la costa. La "vida media" de los edificios urbanos –período después del cual la mitad de los edificios erigidos en un año dado han sido derruidos o sustituidos– parece estar entre 50 y 100 años. Así pues, el carácter destructor del cambio climático dependerá fundamentalmente de la velocidad con que se produzca.

Acabamos de ver que pueden esperarse importantes consecuencias cuando el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera alcance un nivel doble del que existía a mediados del siglo XIX. ¿Cuándo podría suceder esto? El espectro de respuestas probables depende de otras dos cuestiones: la futura tasa de consumo de combustibles fósiles y la futura proporción que quede en el aire del dióxido de carbono emitido como consecuencia de la actividad humana.

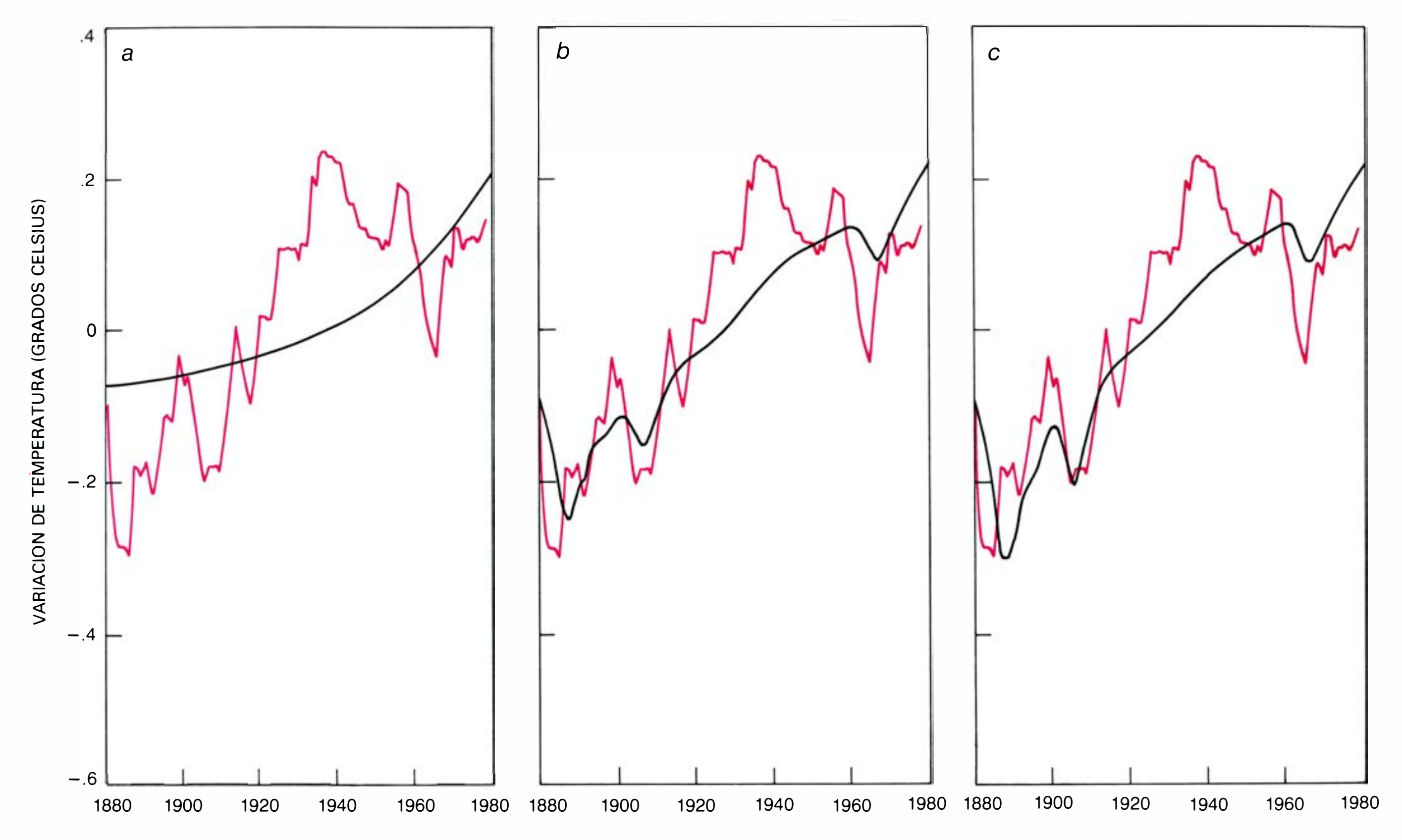
Esta proporción se llama la fracción atmosférica. La futura duplicación del dióxido de carbono con respecto al nivel probable del siglo XIX requeriría la adición de aproximadamente 500 gigatoneladas de carbono a la atmósfera, además de la cantidad ya existente en ella en 1980. Si la fracción atmosférica mantiene el valor que ha tenido en los dos últimos decenios, la cantidad de carbono que se habría de inyectar en el aire estaría entre 1000 y 1250 gigatoneladas, algo así como 200 veces las emisiones anuales durante los últimos años. Sin embargo, a causa del continuo aumento de la población, el ritmo mundial de uso de energía necesitará ser en el futuro mayor de lo que es ahora, a fin de mantener un suministro constante de energía a cada persona. Las poblaciones están creciendo lentamente en los países desarrollados de Europa, América del Norte, Rusia y el Japón, y en ellos el consumo de energía por persona se podría reducir apreciablemente mediante diversas medidas factibles de conservación de energía. Pero el 70 por ciento de los seres humanos de las naciones en desarrollo, donde las poblaciones están todavía creciendo rápidamente, necesitará mucha más energía por persona de la que están usando ahora, si es que van a salir de la pobreza.

Incluso considerando un crecimiento económico moderado en los países en vías de desarrollo, el uso mundial de energía debe probablemente aumentar en un 2 a 3 por ciento anual. Esto equivaldría a una continuación de la tendencia actual. Desde 1973, el consumo combinado de carbón, petróleo y gas natural ha estado aumentando a razón de 2,25 por ciento por año. Antes de la crisis del petróleo de 1973, la velocidad de crecimiento era de más de un 4 por ciento. Si la mayor parte de la energía continúa procediendo de combustibles fósiles y las contribuciones netas de la biosfera son pequeñas, las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera en el año 2050 podrían ser de 20 a 40 gigatoneladas por año. A mediados del siglo XXI, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tendría un valor doble del que poseía a mediados del siglo pasado.

Como hay otras fuentes de energía que pueden sustituir parcialmente (y quizá algún día completamente) a los combustibles fósiles, sólo se pueden hacer conjeturas plausibles acerca de la cantidad de combustibles fósiles que se consumirá en un futuro próximo. Sin embargo, la situación actual de consumo de combustibles fósiles, en la cual casi dos tercios de la producción de dióxido de carbono proviene del petróleo y del gas natural, es seguro que no puede continuar mucho tiempo porque las existencias aprovechables de tales combustibles son limitadas. Con las proporciones actuales de combustibles y de velocidad de crecimiento de su consumo, la mayor parte del petróleo y del gas natural estará agotada hacia 2050, mientras que quedará del 90 al 95 por ciento del carbón explotable. El problema del dióxido de carbono guarda,



LA VARIACION CON LA LATITUD calculada para el contenido de dióxido de carbono atmosférico se da para alturas a las que la presión atmosférica es de 700 milibares *(negro)* y 900 milibares *(color)*. Los puntos grises representan medidas a lo largo de varios períodos desde 1958 hasta 1979 a latitudes desde Barrow, en Alaska, al Polo Sur. Los datos están en partes por millón de dióxido de carbono por encima y por debajo de la concentración media anual en Mauna Loa. Los valores más altos se encuentran al Norte de 40 grados de latitud Norte, donde el consumo de combustibles fósiles es también el más alto.



TENDENCIA AL CALENTAMIENTO que puede haberse producido, al menos en parte, como consecuencia del aumento en la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera. Resulta evidente en las variaciones de temperatura registradas de 1880 a 1980 (*color*). J. E. Hansen y sus colegas, de la NASA, compararon las observaciones con un modelo climático (*negro*) que supone un aumento de 2,8 grados Celsius en la temperatura media global si se duplica el contenido atmosférico de dióxido de carbono. Diferentes versiones del modelo tenían en cuenta: *(a)*, los efectos del dióxido de carbono solamente; *(b)*, los efectos conjuntos del dióxido de carbono y los aerosoles volcánicos; y (*c*), los efectos de esos factores y de una hipotética variabilidad de 0,2 % en la luminosidad del Sol. Se consideró también la capacidad de absorción de calor de la capa superficial oceánica, de varios cientos de metros de espesor.

pues, una estrecha relación con el futuro consumo de carbón.

Casi el 90 por ciento del carbón explotable está en la Unión Soviética, China y los Estados Unidos. Por tanto, sólo esos tres países pueden desempeñar un papel decisivo en cualquier futuro incremento en la cantidad de dióxido de carbono atmosférico. Los Estados Unidos tienen sistemas de explotación de minas y transporte más avanzados que los otros dos países; quiere ello decir que, durante los decenios venideros, la principal responsabilidad sobre lo que se haga con el carbón recaerá probablemente sobre los Estados Unidos.

En cuanto a la fracción de dióxido de carbono que permanece en la atmósfera, con el tiempo debería ser posible hacer estimas útiles mediante modelos analíticos del ciclo del carbono y de la circulación oceánica. Hay acuerdo general sobre el hecho de que la desforestación ha contribuido, en una magnitud bastante grande, al aumento de dióxido de carbono en la atmósfera. La razón es que los bosques incorporan de 10 a 20 veces más carbono por unidad de superficie que las tierras cultivadas o los pastizales. Por otra parte, la invasión por bosques de tierra de cultivo abandonadas, la repoblación forestal deliberada y la silvicultura mejorada que se practican en China, Europa y Norteamérica deben compensar en cierto grado la pérdida de bosques en otras partes.

La vigilancia mundial directa de la biomasa viviente y del contenido de materia orgánica de los suelos por medio de imágenes de satélites combinadas con exploraciones desde el suelo debería en principio proporcionar datos sobre las variaciones de esas magnitudes causadas por la actividad humana. En esa clase de estudios están empeñados George M. Woodwell y sus colaboradores en el Laboratorio de Biología Marina en Woods Hole, pero la evaluación de los datos ha resultado ser extraordinariamente difícil. La cantidad de carbono liberada anualmente por desforestación ronda, verosimilmente, entre una y dos gigatoneladas.

De los limitados datos disponibles se puede llegar a la conclusión de que en los dos últimos decenios, entre el 40 y el 50 por ciento del dióxido de carbono producido por actividades humanas ha permanecido en el aire. Sin embargo, no es seguro que la fracción atmosférica se mantenga constante en el futuro. Hay diversos factores que influyen en el valor de esta fracción. El factor de amortiguación debe hacerse mayor a medida que el dióxido de carbono atmosférico aumenta, y esto reducirá la velocidad a la cual el carbono se transfiere del aire al océano. Por otra parte, si disminuye el ritmo de emisiones de carbono, como lo ha hecho en los últimos años, habrá más tiempo para que los océanos absorban una cantidad dada de dióxido de carbono y, consecuentemente, puede dispersarse más gas en las capas oceánicas profundas.

Es probable que la velocidad a la cual se están talando bosques en beneficio de la agricultura decrezca en los próximos años al acercarse a los límites de la tierra cultivable y al obtenerse mejores cosechas de la tierra ya en cultivo mediante técnicas más perfeccionadas. Al mismo tiempo, el aumento del dióxido de carbono atmosférico puede producir un aumento en la fotosíntesis y, por ende, en la cantidad de biomasa, al menos en algunas regiones. La combinación de factores podría dar por resultado un flujo neto de carbono de la atmósfera a la biosfera. En 1977, Walter H. Munk y el autor construyeron un modelo bastante primitivo que pretende tomar en cuenta todos esos

factores. Nuestros cálculos sugieren que la fracción de dióxido de carbono procedente de actividades humanas que permanece en el aire se mantendrá casi constante, oscilando su valor entre el 40 y el 50 por ciento, hasta que se pase el máximo de velocidad de consumo de combustibles fósiles. Este máximo deberá alcanzarse en los umbrales del siglo XXII.

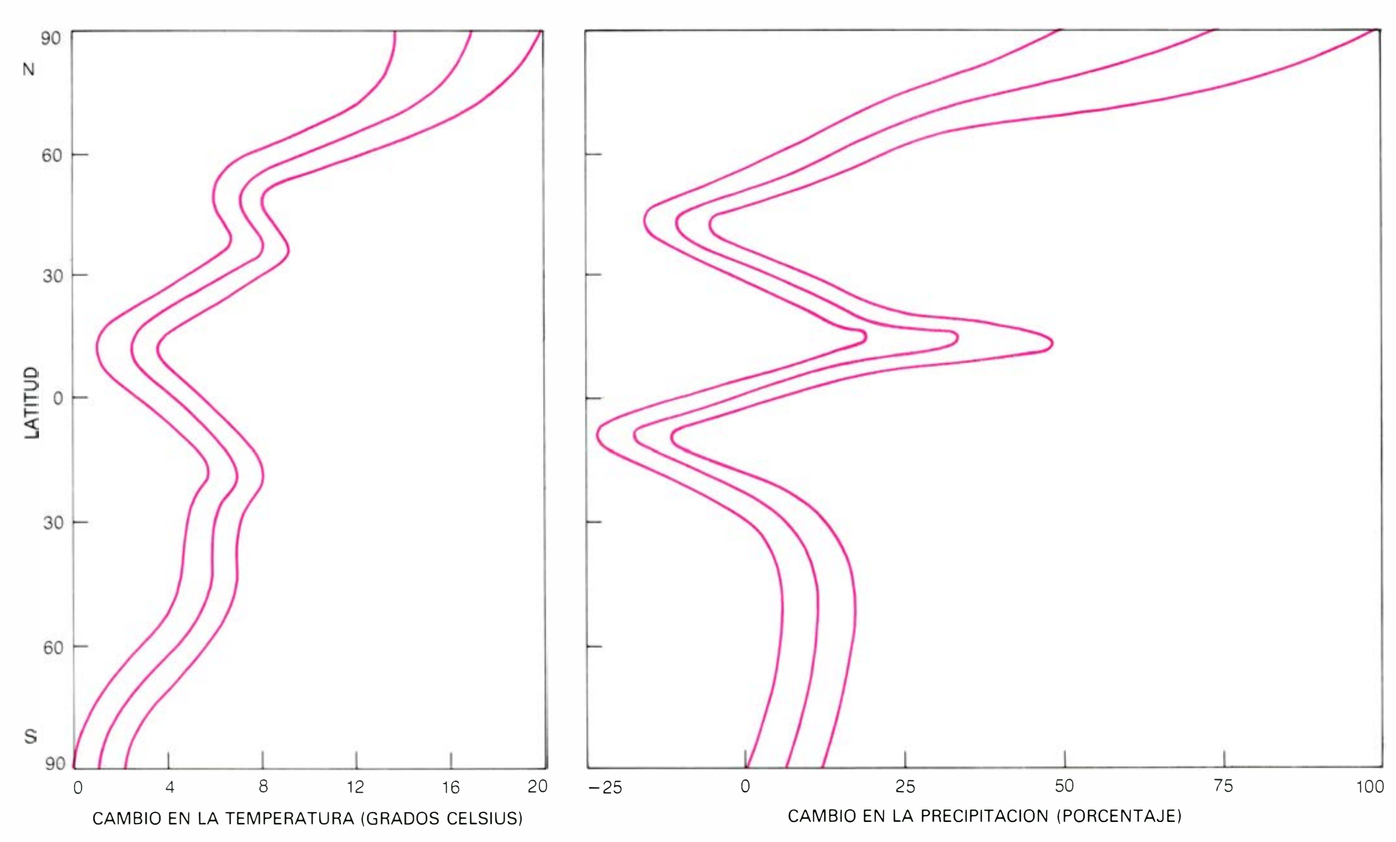
En resumen, el problema del dióxido de carbono está oscurecido por muchas incógnitas e incertidumbres. En verdad los únicos datos disponibles son las medidas reales de CO_2 atmosférico: las series de veinte años de Mauna Loa y del Polo Sur y algunas cifras bastante fidedignas de las Naciones Unidas sobre el consumo anual de combustibles fósiles en los países desarrollados. Estos datos, sin embargo, son suficientes para sugerir que deben tomarse medidas para obtener más pruebas y considerar las consecuencias de un aumento continuado del dióxido de carbono atmosférico.

La experiencia ha demostrado que el proyecto y construcción de obras hidráulicas para la conservación del agua en las cuencas de ríos importantes puede durar varios decenios. No es demasiado pronto para empezar a pensar de qué forma la utilización programada del agua podría atenuar los efectos potenciales de los cambios climáticos o incluso aprovecharlos. Varias medidas acuden al pensamiento: (1) Cambios en la legislación que permitieran el transvase de aguas de una cuenca hidrográfica a otra, por ejemplo del río Columbia al Colorado; (2) mejorar la eficacia del uso del agua para la irrigación; (3) conservación de las aguas residuales y de la cantidad suministrada a los municipios; (4) limitación del tamaño de las zonas dedicadas a regadío; (5) aumento de las cosechas por unidad de volumen de agua empleada; y (6), intensificación del rellenado de los acuíferos.

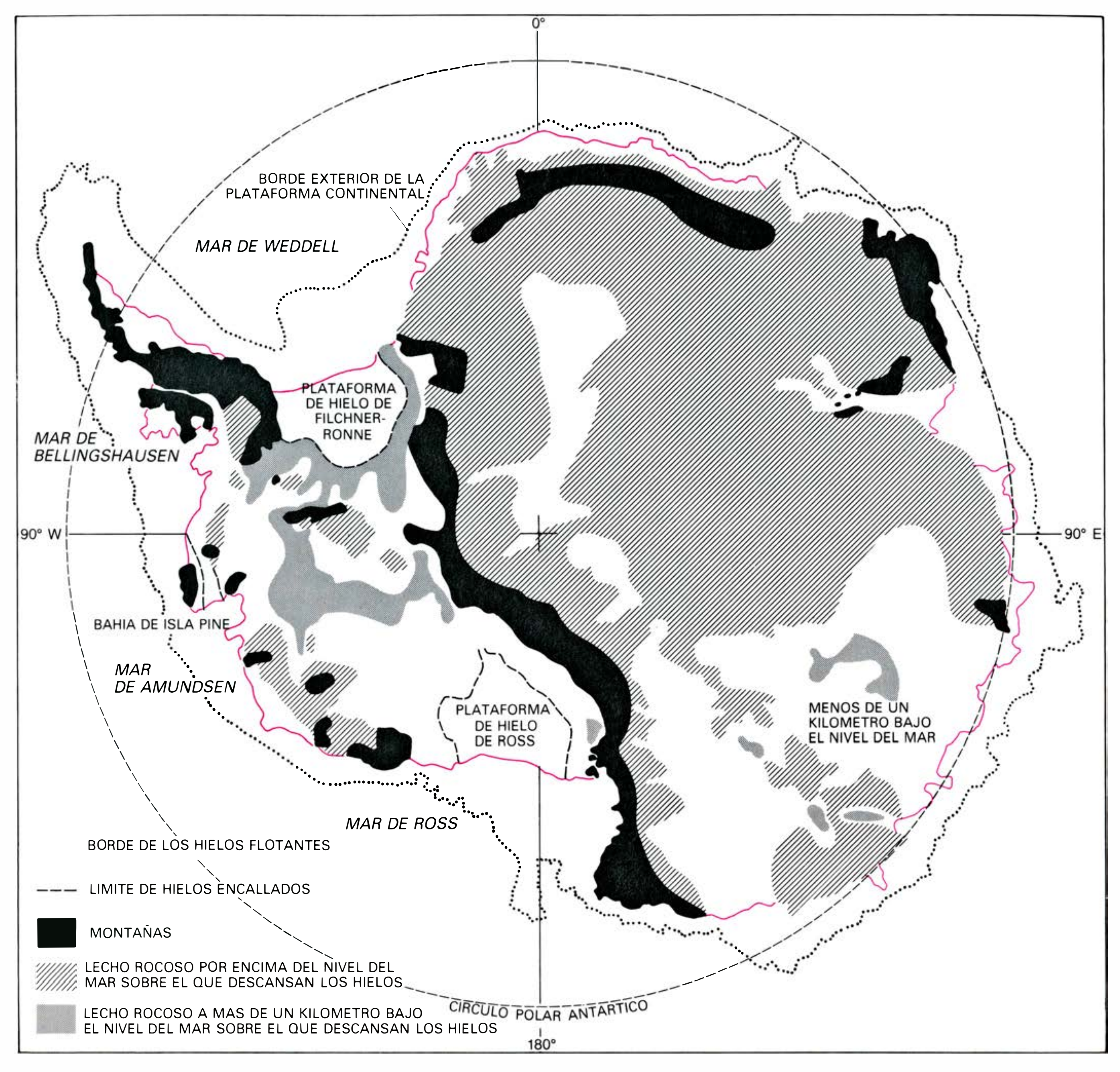
La investigación moderna sobre agricultura intensiva es fácilmente adaptable a diferentes condiciones climáticas. Rosenberg ha citado el ejemplo del trigo rojo de invierno, que se cultiva desde Dakota del Norte hasta el Norte de Texas en regiones con amplias variaciones de temperatura y precipitación. Hace algunos decenios, se cosechaba sólo en Nebraska Oriental. Se podrían hacer esfuerzos comparables para averiguar qué clases de cultivos podrían crecer mejor en regiones donde sean posibles cambios climáticos como consecuencia del aumento de dióxido de carbono en la atmósfera.

Las indicaciones de los corales fósiles revelan que el nivel del mar fue aproximadamente seis metros más alto durante el último período interglacial (hace unos 120.000 años) de lo que es ahora. Los arrecifes de coral que se formaron durante el período de aguas altas quedaron abandonados por la ulterior retirada de aquellas, dejando plataformas fósiles. La subida transitoria del nivel del mar pudo haber sido producida por la fusión de la capa de hielo de la Antártida Occidental. La perforación de la actual capa de hielo podría proporcionar información útil. Podría esperarse hallar una discontinuidad en los depósitos de hielo anuales a una profundidad correspondiente a un tiempo de aproximadamente 120.000 años atrás. La naturaleza de la discontinuidad podría servir de punto de referencia para conocer la sucesión de acontecimientos.

Si la capa de hielo se desintegró en el último período interglacial, sería un problema de investigación de gran importancia determinar a qué velocidad se destruyó. En la actualidad, las barreras de hielo de la Antártida Occidental están desprendiendo enormes témpanos a una velocidad que corresponde a un movimiento hacia el mar de aproximadamente un kilómetro por año. A lo largo de 1200 kilómetros de costa de



EFECTOS CLIMATICOS de un aumento en la cantidad de dióxido de carbono atmosférico hasta cuantías comprendidas entre 560 y 680 partes por millón (casi el doble del nivel de hace 100 años), estudiados por Hermann Flohn, de la Universidad de Bonn. Las gráficas muestran las variaciones de temperatura *(izquierda)* y de precipitación *(derecha)* en función de la latitud. Flohn supuso que un calentamiento global fundiría el hielo en el Océano Artico durante el verano, pero dejaría una cantidad importante de hielo en el continente antártico. Las tres curvas de cada grupo reflejan el dominio de posibilidades.

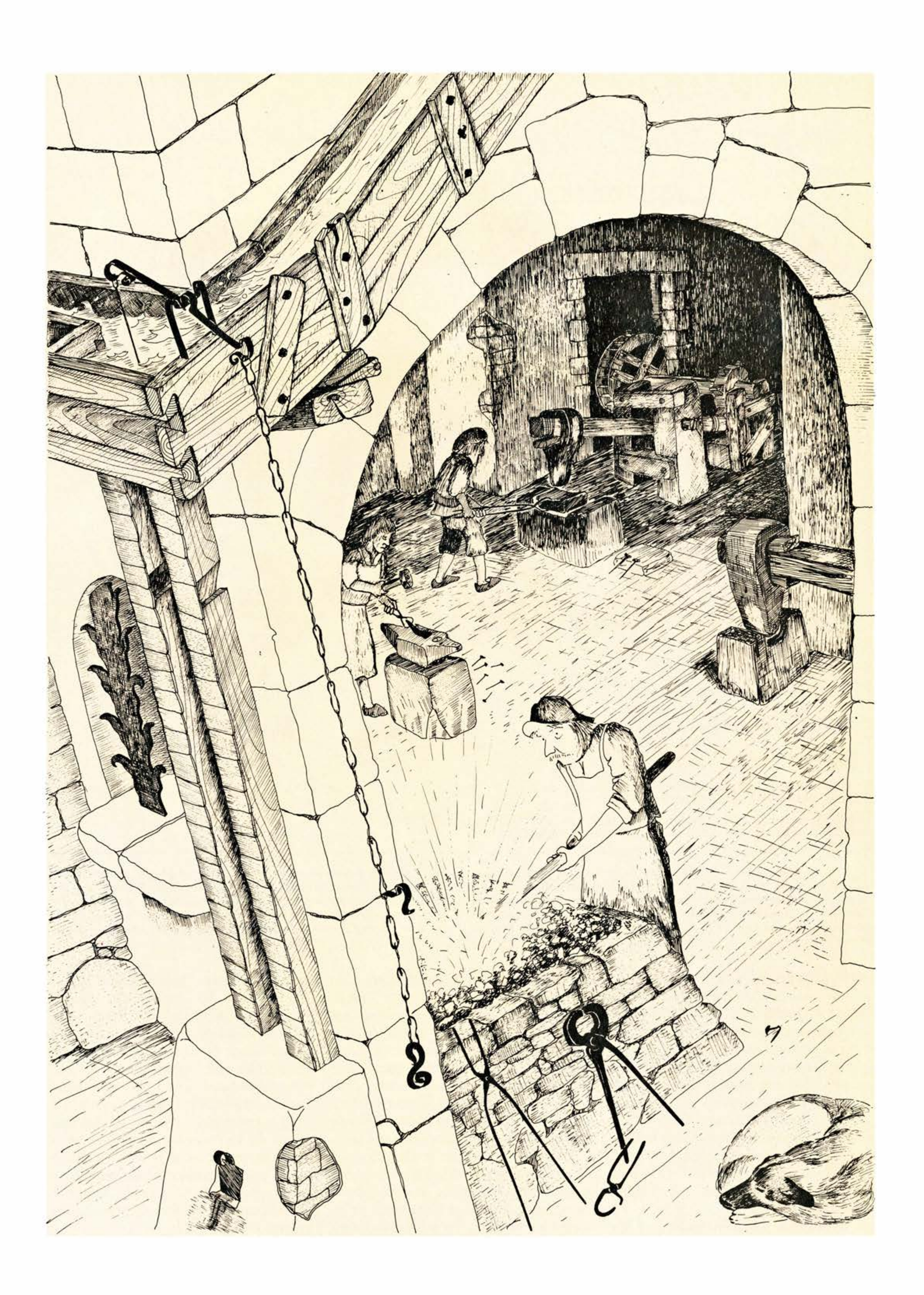


ANTARTIDA OCCIDENTAL: tierras e hielos al Oeste del meridiano cero hasta el meridiano 180 grados. Es un foco de preocupación por la posibilidad de que un calentamiento global, resultante de un aumento de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, fundiera la capa de hielo. Parte del hielo continental se apoya sobre un fondo rocoso que está por encima del nivel del mar, y parte de él sobre rocas que están bajo el nivel del mar. La mayor parte del hielo en las Barreras de Ross y de Filchner-Ronne está flotando, pero está anclado aquí y allá por accidentes del fondo submarino que se elevan lo suficiente para tocar la base de los hielos. La fusión del hielo que está por encima del nivel del mar podría elevar el nivel de los océanos hasta seis metros.

hielo, cada año se están depositando en el mar unos 500 kilómetros cúbicos de hielo. A igualdad de otros factores, el resultado sería un aumento de 1,5 milímetros por año en el nivel del mar, lo que es un hecho observado en los promedios globales anuales del nivel del mar obtenidos a partir de mareógrafos.

Terrence J. Hughes, George H. Denton y James L. Fastook, de la Universidad de Maine en Orono, y John H. Mercer, de la Universidad de Ohio, han construido modelos que indican que el movimiento de las barreras de hielo de la Antártida Occidental podría acelerarse hasta 20 kilómetros por año, elevando el nivel del mar hasta 3 centímetros por año o unos tres metros por siglo. Tal subida tendría serias repercusiones en muchas regiones costeras. Muchos glaciólogos creen que es improbable una velocidad tan alta, pero admiten que es posible. El movimiento de las barreras de hielo podría vigilarse mediante observaciones por satélites.

Las sociedades han acumulado mucha experiencia para reaccionar frente a catástrofes naturales a corto plazo: episodios tales como huracanes, inundaciones, sequías, erupciones volcánicas, terremotos e incendios forestales. Sin embargo, los cambios que pueden producirse como resultado del aumento de la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera no serán episodios, sino variaciones ambientales lentas, difusas y omnipresentes. Serán imperceptibles, para la mayoría de la gente, de un año a otro a causa del pequeño incremento anual de la variación climática. Sería prudente empezar a pensar ya desde ahora cuáles podrían ser los cambios y cómo podría la humanidad evitar o amortiguar de la mejor manera los efectos desfavorables.



La farga catalana

Procedimiento directo de obtención de hierro y acero bajo en carbono, de origen catalán, que gozó de difusión mundial hasta el siglo pasado

Pedro Molera

Desde el 1500 a. de J.C., el hierro viene siendo el metal más utilizado. El acero es una aleación base hierro con 2 por ciento de carbono, como máximo. En España se producen unos doce millones de toneladas anuales de acero. El procedimiento convencional de obtención del acero consiste en mezclar los minerales oxidados de hierro (menas) con carbón de coque en un horno de cuba de grandes dimensiones: horno alto. Al introducir aire caliente en dicho horno tiene lugar la combustión del carbón y la formación del monóxido de carbono, que, en contacto con la mena, produce la reducción: conversión de los óxidos metálicos en hierro y del monóxido de carbono en dióxido. El producto metálico resultante del horno alto es una aleación base hierro, denominada arrabio, que contiene carbono, silicio, fósforo y azufre. El arrabio sirve para alimentar los convertidores de las acerías, donde disminuye su contenido en carbono, en silicio y en fósforo, y se convierte en acero. La descarburación total del arrabio conduce a la obtención del hierro.

El procedimiento descrito para la fabricación del hierro constituye un método indirecto, pues la obtención del hierro implica la obtención previa del arrabio. Actualmente se están poniendo a punto gran cantidad de procedimientos directos. Consisten éstos en la obtención de esponja de hierro o prereducidos a partir de las menas trituradas, que se reducen mediante distintos hidrocarburos. Así, se fabrica directamente hierro más o menos puro, que, junto con la chatarra de hierro, se introduce en hornos calentados mediante el arco eléctrico que salta entre un electrodo de grafito y la carga del horno. En los hornos eléctricos el arco sirve para fundir la carga. Se aumenta el contenido en carbono de la carga disolviendo el grafito del electrodo, y se disminuye inyectando al horno chorros de oxígeno.

Mas los procedimientos directos de obtención del hierro y acero bajo en carbono no son nuevos. Desde el siglo x, y hasta 1878, existió en Cataluña un método de reducción directa: la farga, que dio nombre a la instalación o herrería. En éstas, se fabricaban hierro y acero de bajo contenido en carbono y de excelente calidad. Su fama se propagó por Europa. Hubo fargas en Córcega, Países Bajos, Alemania, Indias Orientales, Madagascar, Finlandia y hasta en las cuencas de los ríos Orinoco y Mississippi. El procedimiento extractivo empleado en estas fargas ha pasado a la historia de la metalurgia como el procedimiento de la farga catalana, procedimiento catalán o, simplemente, farga catalana. Esa técnica aportó la materia prima suficiente para abastecer las industrias transformadoras (herramientas, clavos, armas, llaves, rejas) que, además de satisfacer la demanda interior, exportaban sus productos.

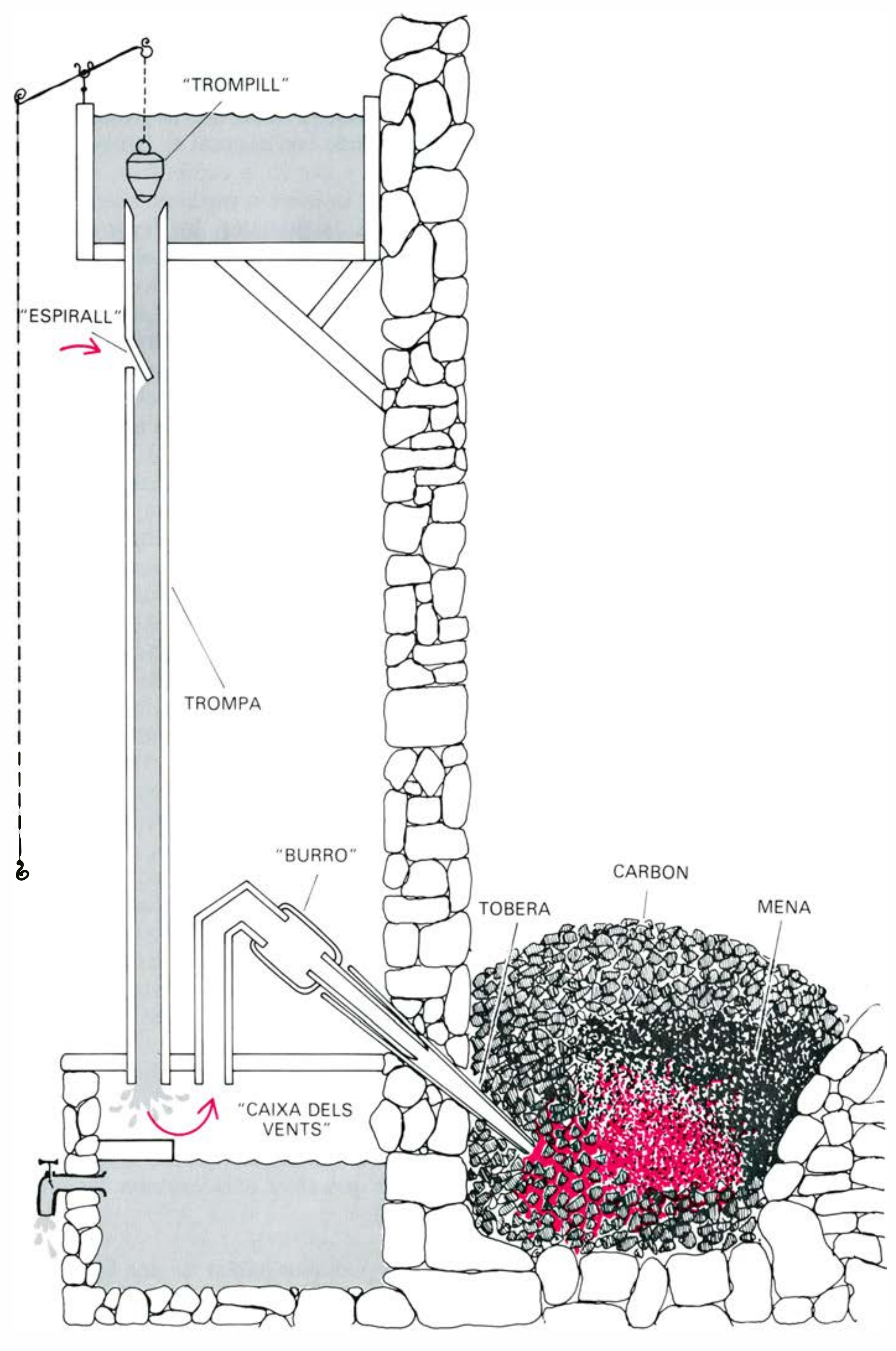
Aparte del acero de procedencia meteorítica y de hierro nativo, encontrado en forma de nódulos metálicos dentro de las piedras basálticas de Groenlandia y Palestina, las civilizaciones antiguas, que carecían de medios para alcanzar la temperatura de fusión del hierro (1535 grados Celsius), practicaban procedimientos directos de obtención de hierro parecidos a los empleados por ciertas tribus del Africa central, que, todavía hoy, llenan los hoyos abiertos en el suelo con mineral de hierro y con carbón y avivan la combustión soplando con la boca o mediante fuelles de pellejos de animales. Sin llegar a la fusión del hierro, se reduce el mineral y obtienen una masa metálica porosa e impura que se purificará en la forja merced al llamado efecto expulsión, que consiste en aplicar presión a la masa metálica impura para eliminar, de ella, las imperfecciones. Con un procedimiento muy parecido al enunciado debióse construir, 300 años antes de Cristo, la famosa columna de Delhí, que pesa 6,4 toneladas métricas.

En síntesis, el procedimiento catalán consistía en mezclar mineral de hierro (óxido de hierro), convenientemente triturado, con carbón vegetal, también triturado, en un horno. Se introducía en el horno aire a presión a través de una tobera situada a escasos centímetros del suelo del horno. Mediante la combustión del carbón vegetal con el aire se conseguían temperaturas de unos 1200 grados Celsius, suficientes para convertir el mineral en una masa pastosa formada por nódulos de hierro y restos de escoria. La masa se compactaba y purificaba forjándola con el martinete. (Conviene hacer una precisión terminológica si queremos evitar la confusión reinante en este sector: se llama farga a la instalación donde se obtenía hierro y acero; forja, un procedimiento de hechurado de los metales por deformación en caliente; fragua, un horno que sirve para calentar los metales.)

No podemos hablar de una farga arquetípica. Cada instalación se regía por las condiciones de ubicación, medios económicos del dueño y capacidad del técnico que la ideaba. Pero en todas ellas había un horno con su respectiva trompa de agua y uno o dos martinetes. El horno, sin duda el ele-

VISTA GENERAL DE UNA FARGA, donde se aprecia la disposición relativa de los principales elementos: el horno catalán y el sistema de forja. Ambos elementos se accionaban mediante un salto de agua. La trompa de agua insuflaba aire para avivar la combustión del carbón vegetal del horno y la rueda hidráulica movía el martinete de compactar y el de hechurar: el primero purificaba la esponja de hierro y el segundo servía para darle forma útil para las industrias derivadas. Los aspiradores ("espiralls") succionaban el aire atmosférico, que se arrastraba hasta el final del tubo, hasta la caja de los vientos ("caixa dels vents"), de donde se inyectaba en el horno. (Recreación ideal de M. Alonso y P. Molera.)

mento más importante, consistía en una cavidad de forma troncopiramidal invertida, cuyas dimensiones de la base mayor estaban en torno a los 60 por 50 centímetros. La altura era de unos 80 centímetros. Dentro de la nave industrial, el horno estaba situado junto a una pared principal denominada "piec del foc" (pie del fuego). Todas las paredes del horno presentaban superficies planas, menos "l'ore o contravent" (contraviento), que, para facilitar la extracción del producto reducido, ofrecía una superficie convexa, y estaban parcialmente recubiertas con planchas de acero. La pared del horno adosada al "piec del foc" y opuesta a "l'ore" se denominaba "les porgues" (las cribas) y estaba atravesada por la tobera que inyectaba aire al horno. Entre ambas paredes estaba el "lleteirol" (rebosadero), pared agujereada para facilitar la eliminación de la escoria líquida, frente a la cual se encontraba la "cava" (cava), pared de piedra sin revestir y ligeramente inclinada.

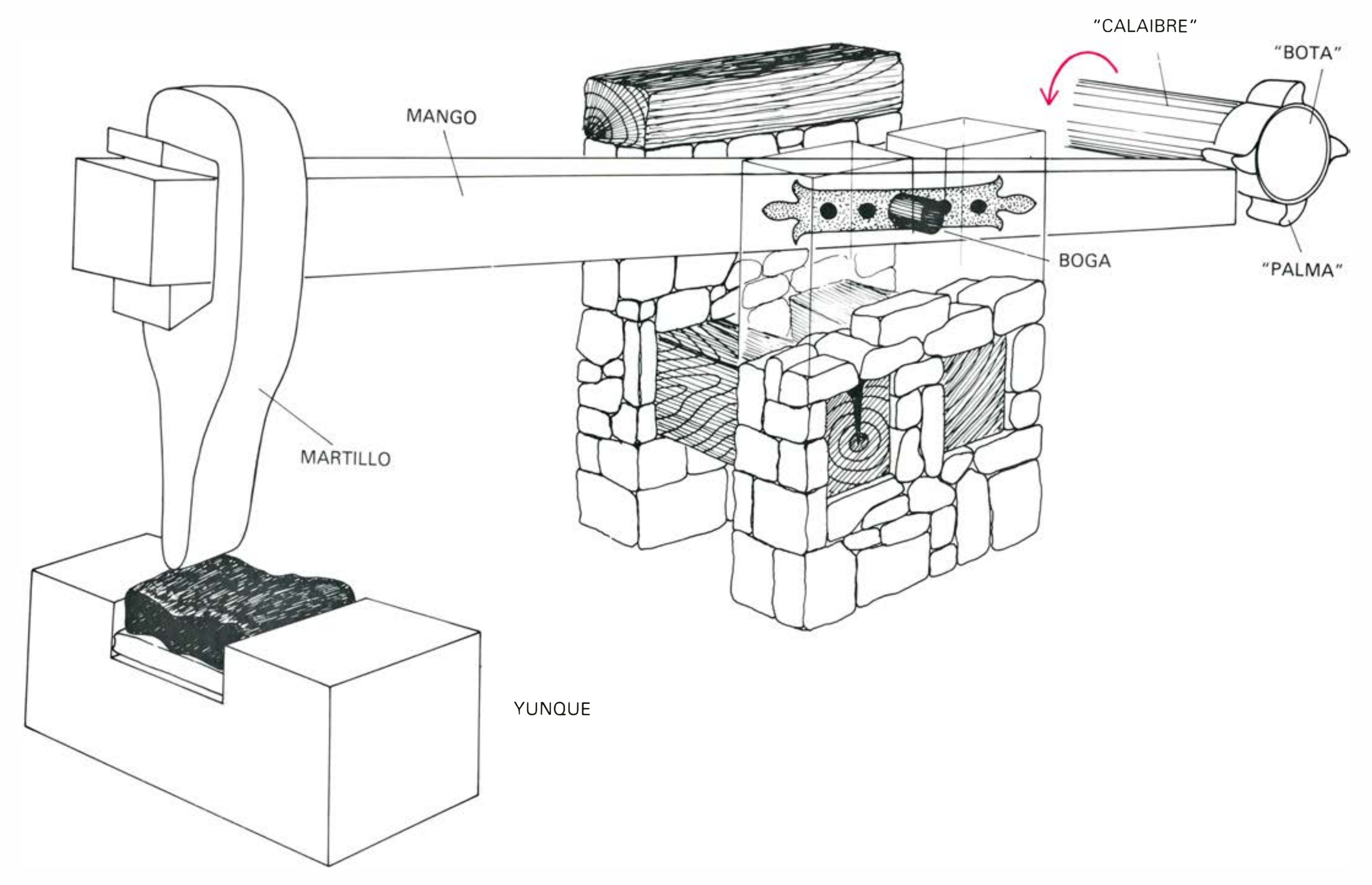


HORNO utilizado por la farga (horno catalán), provisto de la trompa de agua. El agua, que descendía por un tubo con estrangulamiento, arrastraba aire a través de los "espiralls" y lo soltaba en la "caixa dels vents", desde donde se inyectaba al horno a través de la tobera. El aire se encontraba con carbón vegetal encendido y se originaba monóxido de carbono, el cual reducía los óxidos de hierro a metal. Para evitar la posterior oxidación del hierro se mantenía la masa reducida recubierta de carbón en polvo. El "burro" conectaba la tobera con la "caixa dels vents" y el "trompill" servía para controlar el tiro del aire.

Peculiaridad del procedimiento catalán era el recurso a la trompa de agua, sistema empleado para inyectar aire al horno. Se aprovechaba lo que más tarde daría en llamarse el efecto Venturi. A tal fin, se canalizaba agua del río hacia un depósito, desde donde descendía por un tubo vertical provisto, en su parte superior, de un estrangulamiento y de sendos agujeros denominados "espiralls" (aspiradores). Puesto que el gasto, definido como el producto de la velocidad del agua por la sección del tubo, ha de mantenerse constante a lo largo del tubo, la velocidad del agua será mayor en la sección estrangulada. Se aplica a este sistema la ley de Bernouilli, que se expresa diciendo que la suma de la presión atmosférica y la presión cinética debida al desplazamiento del agua ha de permanecer constante. La presión cinética aquí se define como el semiproducto de la densidad del líquido por el cuadrado de la velocidad. Para que la suma anterior sea constante, al aumentar la velocidad del líquido en el estrangulamiento es necesario que disminuya la presión. En el procedimiento catalán este descenso de la presión se traducía en succión del aire atmosférico a través de los "espiralls". Este aire se arrastraba hasta el depósito que había al final del tubo (la "caixa dels vents", caja de los vientos), de donde se eliminaba inyectándolo en el horno a través de la tobera.

La tobera, que mantenía una distancia crucial con el fondo del horno, estaba inclinada con respecto a la pared de éste. Ambos detalles repercutían decisivamente en la calidad del producto obtenido. El ángulo de incidencia de la tobera debía hallarse entre los 35 y los 45 grados y mediaba una distancia al fondo del horno de unos 10 o 20 centímetros. (Contemporánea de la farga fue, en España, la ferrería vasca, desarrollada en Euskadi, donde se han llegado a contabilizar unas 300 instalaciones. Esta se diferenciaba de la farga por el sistema empleado para inyectar aire al horno, pues disponía de dos grandes fuelles accionados por la rueda hidráulica, de modo que mientras uno soplaba el otro aspiraba y se obtenía un tiro continuo de aire.)

Para forjar (deformación del metal en caliente) se empleaba el martinete, constituido por el martillo, el yunque y el maderamen. El martillo ("mall", en catalán) consistía en una masa de acero de unos 500 kilos de peso colocada en el extremo de un gran mango hecho con el tronco de un árbol, roble por lo común, de unos 4 metros



MARTINETE DE LA FARGA, en esquema. La rueda hidráulica convierte la energía cinética del agua, que baja del embalse, en movimiento rotatorio de su eje ("calaibre"), cuyo extremo ("bota") se apoya mediante cuatro salientes ("palmes"), en el extremo del mango del martillo, de modo que un giro completo de la rueda equivale a cuatro subidas y bajadas del martillo, que golpea el yunque. El agua descendía por un tubo de sección cuadrada.

de longitud. La zona central del mango estaba rodeada de una argolla de hierro provista con dos salientes laterales y alineados, que actuaban a modo de eje de basculación del sistema movido por una rueda hidráulica. Formaban la rueda un conjunto de palas de madera clavadas en torno al extremo de un eje ("calaibre") colocado en posición perpendicular al mango del martillo. En la zona de contacto entre ambos ejes, el "calaibre" estaba protegido por una corona de acero ("bota") provista de cuatro salientes (las "palmes"), que se apoyaban sobre la funda de acero del extremo del mango del martillo. El agua canalizada descendía por un conducto vertical de sección cuadrada, caía encima de las palas y la rueda giraba, de modo que en una vuelta completa subía y bajaba el martillo cuatro veces.

El martillo golpeaba encima del yunque. Constaba éste de la "pedra", la "dema" y el "demet". La "pedra" era una piedra de grandes dimensiones enterrada, casi totalmente, en el suelo, muy resistente a los golpes, en cuya parte superior había labrado un hueco rectangular, donde se introducía una barra de acero rectangular ("demet"), que se sujetaba mediante cuñas metálicas también de acero ("dema").

La farga consumía energía hidráulica, según hemos expuesto. Situada en las proximidades de un curso fluvial, represaba parte de éste por derivación en un canal. La presa tenía dos desagües, cuya distinta función hemos visto: uno de ellos, a modo de trompa, inyectaba aire al horno a través de la tobera y el otro servía para girar la rueda hidráulica, que, a su vez, accionaba el martinete.

La mena utilizada por la farga catalana era óxido hidratado de hierro, la limonita. Abundaba en pequeños yacimientos superficiales en las laderas de los Pirineos orientales. También se empleaba oligisto u óxido férrico. Este se hidrataba previamente dejándolo unos días a la intemperie, tras haberlo concentrado, troceado y extendido por el suelo. Eran unos yacimientos más bien pobres, y de su beneficio nos han llegado noticias correspondientes al Pirineo francés y a su vertiente española.

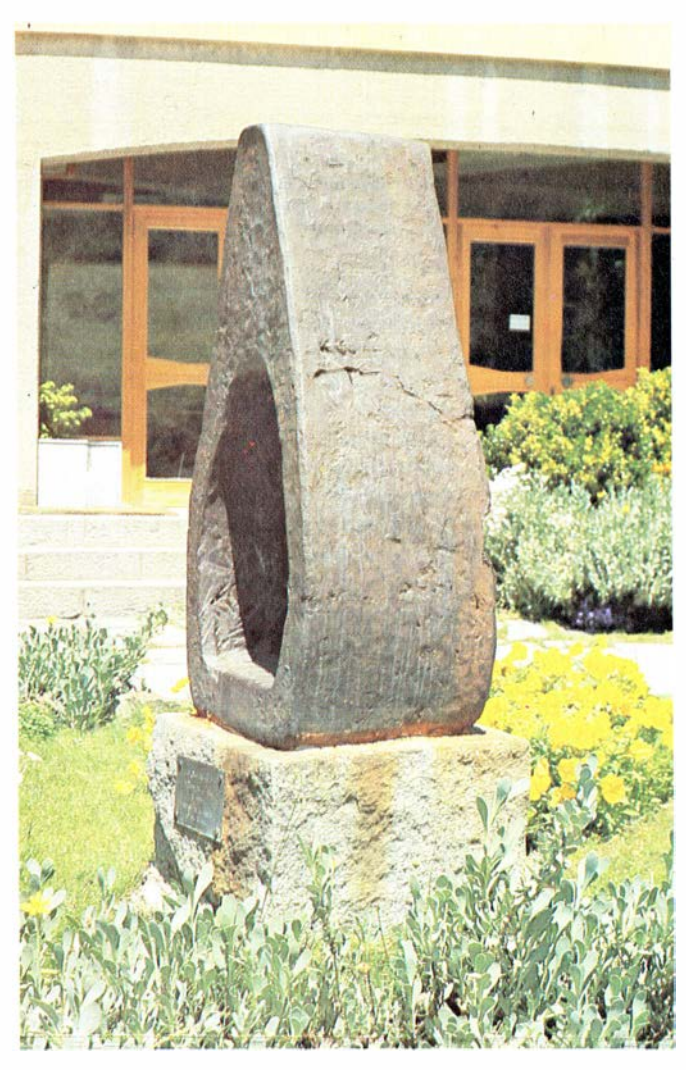
Se empleaba carbón vegetal como combustible y reductor. Procedía de los bosques inmediatos de pinos y hayas. El proceso de carbonización de la madera consistía en quemarla con deficiencia de aire. Se astillaba la leña del tronco y se formaban montones que recubrían con tierra. En la capa de tierra se abrían sendos agujeros; uno en la parte inferior del montículo y otro en la superior; quedaba así asegurado el movimiento de entrada y salida de aire. En el proceso de carbonización se quemaban pequeñas cantidades de lignita y celulosa. La evolución del proceso podía seguirse desde el exterior fijándose en la tonalidad de los humos desprendidos. (Al calentar la leña a temperaturas superiores a los 100 grados C se desprende vapor de agua en forma de humos blancos; si la calentamos a temperaturas comprendidas entre los 120 y los 500 grados C se desprenden humos de color azul, ya que a esa temperatura se destila ácido piroleñoso, que es una mezcla de fenol y guayacol. La desaparición de humos señala el fin del proceso, ya que entonces empieza a quemarse el carbono del carbón.) El carbón era el producto resultante de ese proceso de combustión incompleta. Se trata de una sustancia oscura, frágil, fibrosa, con pocas sales y gran porcentaje de carbono.

De la importancia del carbón da

cuenta la propia instalación de la farga. No se establecía cerca del yacimiento del mineral sino en la vecindad de un bosque. La razón es simple: por cada tonelada de hierro obtenido se consumía mayor cantidad de carbón que de mineral. Y, además, resultaba más cara una tonelada de mineral que una tonelada de carbón. (En un documento del siglo XVII, firmado en Ripoll, en la provincia de Gerona, se expresa que para carbonizar durante 15 años un bosque de pinos sólo se estipularon 6 doblas de oro.) El rendimiento no era alto: para obtener 100 kilogramos de hierro se necesitaban más de 300 kilogramos de mineral y otros 400, por lo menos, de carbón.

La operación de reducción de la mena concentrada se iniciaba cubriendo el fondo del horno con polvo de carbón vegetal. Se le prendía fuego. Una vez caliente el horno, se añadía una capa de trozos de carbón de mayor tamaño. E inmediatamente se superponía una plancha de acero en el centro del horno, paralela a las "porgues". Ello permitía situar una capa vertical de carbón en el lado de la tobera y una capa de mineral al otro lado de la plancha. Se quitaba luego la plancha y se cubría la parte superior del mineral con una capa de pequeños trozos de carbón húmedo y escorias, al objeto de que la superficie externa quedase de forma esférica y concentrase las llamas. Se insuflaba aire por las toberas y a la hora y media se alcanzaban ya temperaturas superiores a los 1200 grados C. Durante tres o cuatro horas consecutivas se iba añadiendo mineral y carbón, al tiempo que por el "lleteirol" se eliminaba la escoria líquida. Si la escoria era densa, lo que evidenciaba un alto contenido en hierro, se volvía a introducir en el horno. La operación terminaba cuando, en el fondo del horno, se formaba una bola irregular de unos 100 kilogramos de peso de hierro o acero dulce con inclusiones de escoria y poros: el "masser" (zamarra). En ese momento empezaba la operación más espectacular de la farga: sacar el "masser" del horno y transportarlo hasta el martinete, lo que requería el concurso de todo el personal.

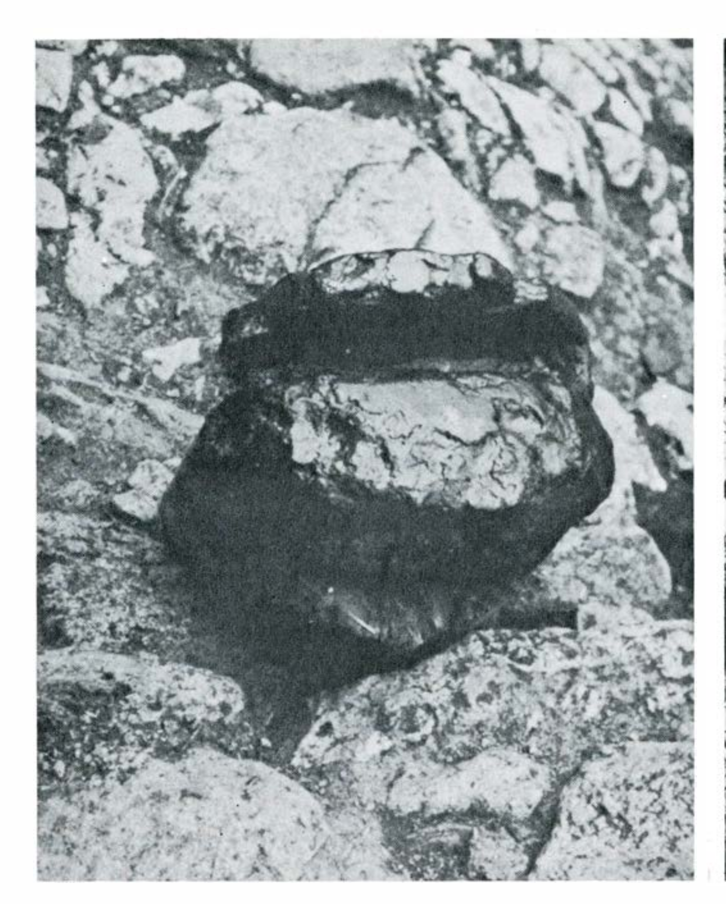
El martinete eliminaba las escorias del "masser", lo compactaba y lo conformaba. Para su forja, el "masser" debía estar todavía caliente. Lo normal era que la compactación se realizara en un martinete y la conformación en otro. El metal obtenido se clasificaba según la calidad y el grado de conformación. La calidad discriminaba entre "ferro comú" (hierro común) y "ferro bó" (hierro bueno). Este último, más acerado que el primero, presentaba una dureza y resistencia mayores y una menor elongación. Para obtenerlo había que dejar largo tiempo el hierro común en el horno rodeado de carbón incandescente, teniendo la precaución de que la masa de hierro no entrara en

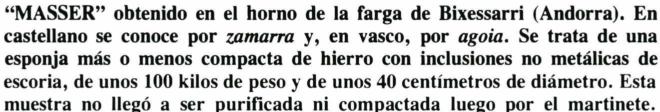


MARTILLO DE MARTINETE, procedente de la farga de Rossell (Andorra) que, a modo de homenaje a la farga catalana y a sus artífices, se conserva delante de la Casa del Gobierno de los Valles del principado de Andorra.

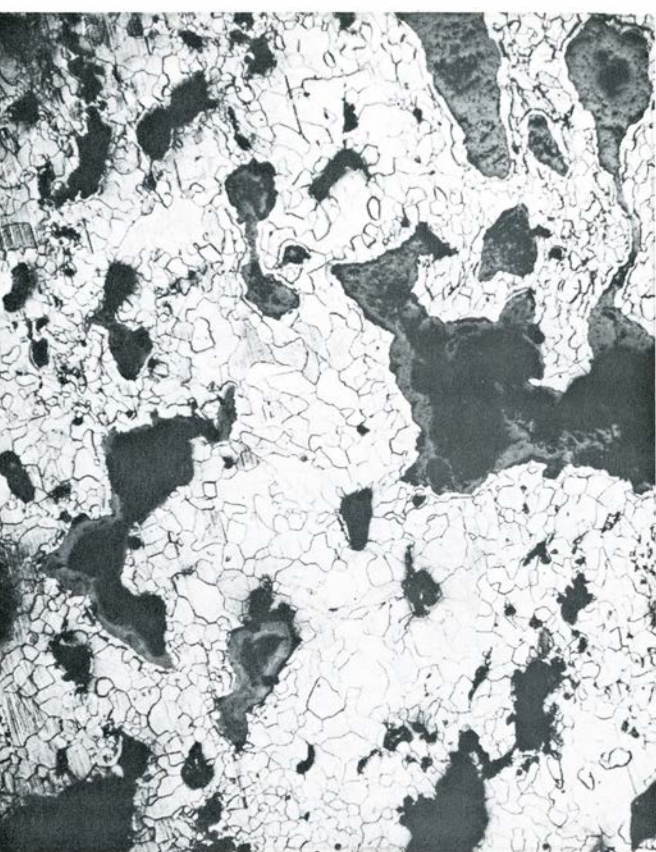


PUERTA FERRISA de la iglesia parroquial de Montagut del Fluvià (en la provincia de Gerona, España). La industria cerrajera adquirió, en Cataluña, un inusitado auge debido a la calidad de la materia prima que ofrecía la farga.





"MASSER" obtenido en el horno de la farga de Bixessarri (Andorra). En castellano se conoce por *zamarra* y, en vasco, por *agoia*. Se trata de una esponja más o menos compacta de hierro con inclusiones no metálicas de escoria, de unos 100 kilos de peso y de unos 40 centímetros de diámetro. Esta muestra no llegó a ser purificada ni compactada luego por el martinete.



MACROGRAFIA DEL "MASSER". Se trata de un corte desbastado y pulido convencionalmente y atacado con nital (alcohol con 3 por ciento de ácido nítrico). Se aprecian pequeños cristales ferríticos en la matriz metálica (*blanco*), junto con inclusiones no metálicas de escoria y poros (*negro*). Apenas se distinguen cristales de cementita o carburo de hierro. (Aumento: × 75 veces.)

contacto con la atmósfera. Por su parte, la forja clasificaba los productos en "batut" (batido) y "buidat" (vaciado).

La calidad de los productos obtenidos prueba que el procedimiento catalán era una técnica metalúrgica muy depurada. Aunque guiados por la intuición y la destreza artesanal, en un oficio que sólo la práctica enseñaba, la verdad es que manejaban una serie de principios y leyes químicas que tardaría muchos siglos en conocerse.

En cada farga había un "picamena", operario cuya misión consistía en triturar la mena concentrada hasta un grado determinado y luego someterla a calentamiento en un horno de carbón situado fuera del edificio de la farga. Este tratamiento de calcinación convertía la limonita o el oligisto hidratado en óxido férrico sólido muy poroso, con mucha superficie específica y vapor de agua, que se eliminaba a la atmósfera. En el caso de que la mena fuera siderita, muy rara en los Pirineos orientales, este tratamiento térmico lo transformaba en óxido ferroso, sólido poroso, y dióxido de carbono, gas que se eliminaba a la atmósfera. El producto sólido resultante de la calcinación siempre era poroso, aspecto muy adecuado para la posterior reducción heterogénea en fase gaseosa y en fase sólida, pues la velocidad de la reducción dependía de la superficie específica de la mena.

La disposición relativa, en capas verticales, del carbón y de la mena al iniciarse la operación en el horno obedecía al intento de conseguir la máxima eficacia en el proceso: se trataba de obtener la mayor proporción posible de óxido de carbono delante de la entrada de aire de la tobera al horno y luego dirigir este reductor hacia la mena para que se produjeran las reacciones químicas siguientes: el óxido férrico se reducía con el óxido de carbono y daba lugar a óxido ferroso-férrico; éste continuaba reduciéndose, en presencia de óxido de carbono, para convertirse en óxido ferroso, que, por último, se reducía a hierro elemental. El reductor empleado en estas reacciones se oxidaba a dióxido de carbono, que se eliminaba del horno ascendiendo a la atmósfera.

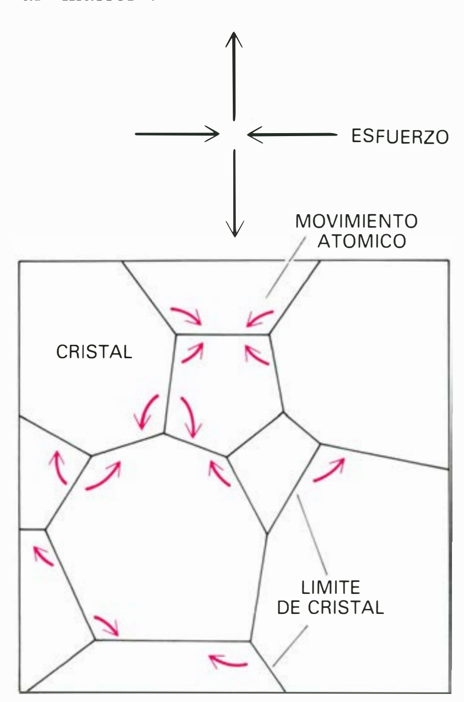
Simultáneas a los procesos de reducción por el óxido de carbono ocurrían las reacciones de carburación y escorificación. A temperaturas superiores a los 910 grados C, el hierro de estructura cúbica centrada en las caras es capaz de disolver el carbono procedente de la disociación del óxido de carbono en carbono y en dióxido de carbono. Así se aceraba el hierro.

Al propio tiempo se eliminaban impurezas que acompañaban a la mena de hierro, tales como silicatos y carbonatos, fundiéndolos y separándolos del hierro o del acero sólido, en el proceso de escorificación. Cuando el horno alcanzaba temperaturas comprendidas entre los 700 y los 800 grados C, el óxido ferroso y el óxido de manganeso reaccionaban con el óxido de silicio y formaban silicatos de hierro y manganeso bastante fluidos, los cuales constituían la escoria, que se separaba del hierro, pues era menos densa y se podía verter fácilmente a través del "lleteirol". A temperaturas superiores a los 900 grados C, se desarrollaba en el horno la reacción de descomposición del carbonato cálcico, ganga muy frecuente en la mena de hierro de los Pirineos orientales, que se descomponía en óxi-

LUGAR		REACCIONES
HORNO DE DESHIDRATACION		$Fe_2O_3 \cdot nH_2O \rightarrow Fe_2O_3 + nH_2O$
HORNO DE LA FARGA	TOBERA	$2\,C + O_2 \rightarrow 2\,CO$
	"MASSER"	$3\,Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2\,Fe_3O_4 + CO_2$ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3\,FeO + CO_2$ $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$
	GANGA	$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$
	ESCORIA	$FeO + SiO_2 \rightarrow FeO \cdot SiO_2$ $2\,FeO + SiO_2 \rightarrow 2\,FeO \cdot SiO_2$ $MnO + SiO_2 \rightarrow MnO \cdot SiO_2$ $FeO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow CaO \cdot SiO_2 + FeO$ $2\,FeO \cdot SiO_2 + 2\,CaO \rightarrow 2\,CaO \cdot SiO_2 + 2\,FeO$ $MnO \cdot SiO_2 + CaO \rightarrow CaO \cdot SiO_2 + MnO$ $CaO + FeS \rightarrow CaS + FeO$ $P_2O_5 + 3\,CaO \rightarrow Ca_3(PO_4)_2$

REACCIONES QUIMICAS que tienen lugar en el horno de deshidratación, controlado por el "picamena", y reacciones que ocurren en el seno de los distintos componentes del horno de la farga: tobera, "masser", ganga y escoria. Todas ellas tienen por finalidad la obtención de hierro más o menos puro.

do cálcico y dióxido de carbono. El CO_2 se eliminaba vertiéndolo a la atmósfera, en tanto que el CaO se incorporaba a la escoria. Debido al carácter básico del óxido cálcico, éste reaccionaba con el óxido de silicio, de carácter ácido, más estable que los silicatos de hierro y de manganeso. Al formarse silicato cálcico en la escoria aparecía óxido ferroso y óxido de manganeso que, en parte, se quedaban en la escoria y, en parte, se reducían, y el hierro y el manganeso resultantes se incorporaban al "masser".



DESPLAZAMIENTO ATOMICO en el mecanismo de la termofluencia. Los átomos situados en los límites de cristal perpendiculares a la dirección del esfuerzo tienden a desplazarse hacia los límites de cristal situados paralelos a dicho esfuerzo. Así se explica la tendencia de los cristales a crecer en la dirección del centro de los poros del "masser".

Sabido es que el azufre fragiliza el acero. Pero las inclusiones de sulfuro en la matriz del acero aumentan la maquinabilidad del mismo, es decir, facilitan la conformación por arranque de viruta. Las cenizas del carbón empleado en la farga como combustible lo contenían en pequeñas cantidades. Se concentraba en las inclusiones no metálicas de la microestructura, como se demuestra a través del ensayo Baumann. (Consiste esa prueba en sumergir una muestra metálica en una disolución de ácido sulfúrico, que convierte los sulfuros en ácido sulfhídrico, apoyarla encima de un papel fotográfico en una cámara oscura y luego, al revelarlo con los reactivos normalmente empleados en fotografía, se detectan las zonas donde había sulfuros, porque se han ennegrecido a raíz de la reducción del compuesto de plata.) La eliminación del azufre de la matriz metálica se consigue por reacción del óxido cálcico con el sulfuro de hierro para dar sulfuro cálcico, termodinámicamente muy estable, y óxido ferroso. El sulfuro cálcico se incorporaba a la escoria líquida y el óxido ferroso se reducía en presencia del óxido de carbono.

El fósforo es otro elemento químico que fragiliza el acero. ¿Por qué se encuentra apenas en los productos férreos trabajados en la farga, siendo así que el ortofosfato cálcico suele acompañar las menas de hierro de los Pirineos orientales? A la temperatura del horno, el ortofosfato cálcico se descomponía en pentóxido de difósforo y en óxido cálcico. El pentóxido de difósforo se reducía en presencia de óxido de carbono y se introducía fósforo en el hierro. Pero como en la escoria del horno había proporción de óxido cálcico suficiente para desplazar la reacción hacia la formación del ortofosfato cálcico que se incorporaba a la escoria, ésta se eliminaba. Ello dificultaba la reducción del pentóxido de difósforo y la consiguiente fosfuración del hierro.

Cuando el "masser" estaba en el horno de la farga, además de las reacciones de índole química, sufría reacciones basadas en los principios de la teoría del estado sólido; se pretendía la sinterización, o soldadura en estado sólido, de los nódulos de hierro recién formados. Los posibles mecanismos que intervenían en estas transformaciones eran los siguientes: difusión superficial, evaporación-condensación, difusión de volumen, termofluencia, cizallamiento de los límites de cristal y recristalización. El mecanismo de sinterización predominante depende de la temperatura de trabajo. A bajas temperaturas (500 grados C), los átomos superficiales tienen suficiente movilidad para desplazarse, dirigidos por la tensión superficial, o fuerzas de atracción entre átomos superficiales, desde la zona convexa hasta la zona cóncava de dos nódulos de hierro que están sinterizándose. Si la temperatura de trabajo es algo superior (600 grados C) empieza a adquirir importancia la sublimación y posterior condensación de las superficies metálicas, sobre todo en las zonas cóncavas; hacia los 700 grados C, predomina el mecanismo de la difusión de volumen a través de las imperfecciones térmicas existentes en los sólidos (límites de cristal, átomos intersticiales y vacantes).

La termofluencia ("creep") es la deformación plástica que experimenta un metal sometido a un esfuerzo y a una temperatura; constituye el mecanismo de sinterización predominante a la temperatura del horno de la farga. En estas condiciones de trabajo, carecen de mayor relieve tanto los mecanismos relativos al deslizamiento de los límites de cristal como la recristalización o eliminación de los defectos reticulares mediante formación de una nueva red cristalina a partir de la existente, sin fundirla.

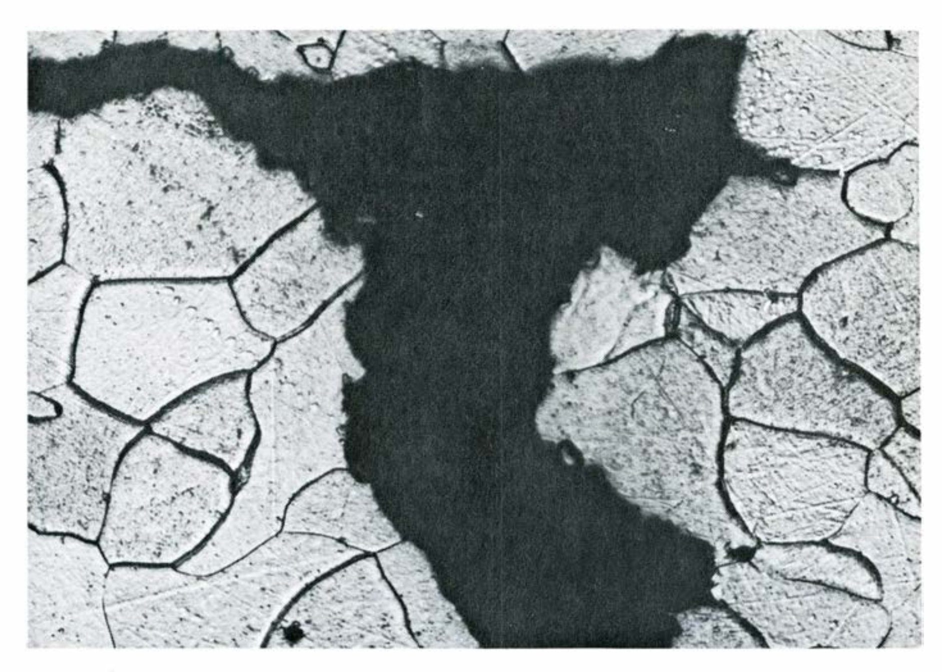
En la microestructura de un "masser" se aprecian poros llenos de inclusiones no metálicas y poros vacíos. Los cristales metálicos que rodean a una inclusión suelen ser más o menos equiaxiales, mientras que los cristales que circundan a un poro, vacío, están alargados hacia la zona que ofrece menor dificultad al crecimiento: el centro del poro. Esta diferencia morfológica de

los cristales metálicos del "masser" encuentra su justificación teórica considerando que el mecanismo predominante era la termofluencia de la austenita (disolución sólida de carbono en hierro de estructura cúbica centrada en las caras) al estar sometido, durante cierto tiempo, al esfuerzo que representa el propio peso de la masa de hierro dentro del horno de la farga. En estas condiciones existía un flujo de átomos desde los límites de cristal situados en dirección perpendicular al esfuerzo de compresión hasta los límites de cristal situados en dirección paralela a este esfuerzo, lo cual implicaba desplazamiento atómico desde los límites de cristal más o menos paralelos a la base del horno hasta los límites verticales.

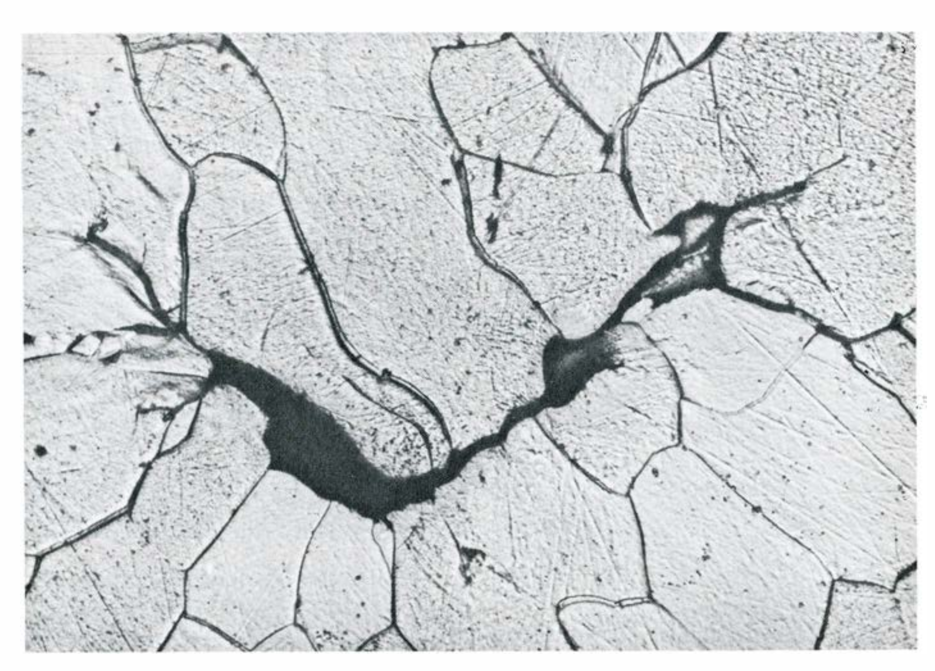
Las reacciones de reducción de los óxidos metálicos, las de escorificación y las de sinterización de los nódulos de hierro conducían a la aparición de la esponja de hierro con inclusiones no metálicas en el horno de la farga. Esta esponja metálica se compactaba y se purificaba forjándola en el martinete. La gran plasticidad de la austenita y la incompatibilidad físico-química de las inclusiones con la matriz metálica contribuían a facilitar la eliminación por efecto expulsión de las escorias ocluidas y a producir la soldadura (soldadura por forja) de las paredes de los poros existentes en la esponja al forjarla a temperaturas superiores a los 910 grados C. Además, la forja disminuía el tamaño de los cristales de hierro y aumentaba, por lo tanto, la ductilidad, o facilidad a la deformación por estirado, del metal policristalino.

La aparición del horno alto, en la segunda mitad del siglo XVIII, como procedimiento indirecto de obtención del hierro supuso la muerte paulatina del procedimiento catalán, cuyo último horno se apagó en 1878. Estamos asistiendo hoy a una vuelta hacia los métodos directos, mucho más lógicos. Los grandes stocks de chatarra que se almacenan en los países desarrollados y el gradual empobrecimiento de las hullas coquizables han impulsado el empleo de los hornos eléctricos de arco en las siderurgias.

Estos hornos se alimentan de chatarra y esponja de hierro. La esponja se obtiene reduciendo mineral de hierro, pulverizado y aglomerado en forma de "sinters" (sinterizados) o "pellets" (pellas o peletizados) porosos, generalmente con gas natural, calentando a temperaturas superiores a los 1000 grados C, con lo cual no se llega a la fusión del hierro, sino que los nódulos de hierro recién reducidos se sinterizan entre sí, igual como ocurría en el horno de la farga. Se han patentado ya más de un centenar de procedimientos directos de obtención de esponja de hierro. Sírvanos de arquetipo el procedimiento denominado Purofer. Se emplea un horno de cuba rectangular que se ensancha uniformemente de arriba abajo para facilitar un descenso continuo de la carga y lograr una perfecta distribución del gas reductor. El gas reductor, que se obtiene mezclando gas natural, aire y gas caliente procedente de la parte superior del horno, está formado por hidrógeno (50 por ciento) y por óxido de carbono (44 por ciento). El horno se calienta a 1200 grados y se alimenta de "sinters". Los demás procedimientos de obtención de esponja son parecidos al descrito. ¿Habrá que decir que la esponja de hierro es un producto muy semejante al "masser"?



INCLUSION NO METALICA, aumentada 200 veces. La escoria que ha quedado formada entre los nódulos de hierro recién reducidos y sinterizados permanece ocluida entre cristales ferríticos que son casi equiaxiales, lo que denota que la existencia de la escoria es anterior al crecimiento de los cristales.



PORO SORPRENDIDO en la etapa previa al proceso de la sinterización de sus paredes, aumentado 200 veces. Los cristales ferríticos que rodean al poro están alargados en la dirección que más facilidad ofrece a su crecimiento; a saber: el centro mismo del poro. Ello nos pone de relieve la preponderancia del mecanismo de la termofluencia en los procesos de sinterización de los nódulos. (Ilustración del autor.)

Las coronas de las galaxias

Observaciones realizadas por satélites indican que el disco entero de nuestra galaxia tiene una extensa envoltura de gas caliente. Lo mismo parece ocurrir en otras galaxias espirales

Klaas S. de Boer y Blair D. Savage

Según la imagen corriente, una galaxia espiral es un disco delgado de estrellas, gas y polvo con un núcleo central más grueso. Nuestra propia galaxia es un sistema espiral de este tipo con un disco de unos cien mil años-luz de diámetro. Rodeando el disco hay una región, llamada halo, ralamente poblada por estrellas viejas y cúmulos globulares. El disco de la galaxia ha sido minuciosamente cartografiado por medio de la radiación emitida por el gas interior, habiéndolo sido también el halo por medio de la radiación emitida por las estrellas pertenecientes a él. Hay un tercer componente de la galaxia que es difícil de detectar desde la Tierra, la llamada corona galáctica. Esta consiste en una envoltura de gas caliente que se extiende decenas de miles de años-luz hacia cada lado del plano central del disco galáctico.

Dada esta dificultad de detectar la corona desde la Tierra, ¿cómo fue descubierta? y ¿cómo se estudia? La respuesta es que el gas caliente de la corona absorbe radiación ultravioleta. Por lo tanto, si el gas está situado entre una estrella emisora en ultravioleta y un instrumento detector de ultravioleta, puede ser detectado por la absorción de la radiación ultravioleta procedente de la estrella. Sin embargo, la mayoría de las longitudes de onda ultravioleta no pueden penetrar en la atmósfera terrestre; así que dichas observaciones pueden realizarse únicamente por encima de ella. Esta fue una de las razones por las que se lanzó en 1978 el satélite *International Ultraviolet Explorer* (IUE). Desde esa fecha los instrumentos del satélite empezaron a suministrar datos abundantes sobre la corona galáctica y sus procesos físicos.

Hasta hace veinte años se creía que la mayor parte del espacio situado a cada lado del plano central de la galaxia no contenía gas. Ahora se cree que en este espacio hay gigantescas corrientes de gas que ascienden desde el plano galáctico y que descienden hacia él. La fuerza que mueve estas corrientes es la explosión de supernovas en el plano galáctico. Tal explosión calienta el gas circundante a una temperatura de un millón de grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto). El gas caliente se mueve hacia fuera del plano galáctico, enfriándose. Entonces comienza a condensarse y retrocede hacia el plano de la galaxia, donde el proceso puede empezar de nuevo. Al ciclo entero se le llama fuente galáctica.

Además de proporcionar las primeras pruebas directas de la existencia de corona en nuestra galaxia, los instrumentos del *International Ultraviolet Explorer* han detectado probablemente coronas alrededor de dos galaxias vecinas. Es más, las coronas de gas caliente pueden ser corrientes en el universo. Si lo son, pueden proporcionar una explicación simple de un viejo y candente problema acerca de la luz de los enigmáticos quasares.

El nombre de corona galáctica le ha sido otorgado por analogía con otros fenómenos. La palabra "corona" se ha empleado en astronomía para describir extensas envolturas de gas que rodean algunos objetos celestes y también para la luz emitida o dispersada por tal gas. La corona más familiar es, desde luego, la del Sol, invisible a simple vista excepto el tiempo que dura un eclipse total de Sol, cuando aparece como un halo luminoso que rodea al oscuro disco lunar. La luz que se origina en la corona solar es principalmente luz del disco luminoso del Sol, dispersada por electrones libres en el difuso gas coronal.

El espectro de la radiación emitida por un objeto celeste define su temperatura. El espectro de la corona solar muestra que ésta es extraordinariamente caliente: entre uno y dos millones de grados Kelvin. (La temperatura de la superficie visible del Sol es de seis mil grados.) Observaciones realizadas con instrumentos de satélites capaces de detectar rayos X indican que muchas estrellas tienen coronas aún más calientes que la solar. También han mostrado que hay planetas y cometas que tienen coronas, aunque son mucho más frías que las de las estrellas, con una temperatura de, a lo sumo, unos pocos miles de grados Kelvin.

Los datos que se han acumulado sobre la existencia de una corona alrededor de la galaxia han creado un problema de terminología entre los astrónomos. El problema nace del hecho de que el significado de la palabra corona coincide en parte con el de la palabra halo. "Halo" proviene del griego "halos", que originalmente significaba el disco del Sol o de la Luna. Aristóteles lo usó en ese sentido. Fue más tarde cuando vino a nombrar el nimbo o aureola alrededor de la cabeza de un santo. En meteorología, "halo" se refiere al anillo de luz dispersada alrededor del Sol o la Luna cuando son vistos a través de cirros.

En astronomía, el significado de la palabra halo se ha ido reduciendo poco a poco hasta llegar a ser la región que rodea el disco galáctico poblada por estrellas viejas y cúmulos globulares. Cuando se llegó a la conclusión de que esta región esférica podía contener gas, a la envoltura de gas se le llamó halo gaseoso por algunos astrónomos y corona por otros. Nosotros reservaremos "halo" para la población de estrellas viejas y "corona" para la envoltura gaseosa de la galaxia.

El disco de una galaxia del estilo de la nuestra tiene brazos espirales, que aparecen mucho más brillantes que las regiones que hay entre ellos. Sin embargo, la concentración de estrellas en los brazos espirales no es tan alta como podría parecer; la razón es que los brazos contienen las estrellas más calientes y luminosas. Tales estrellas son de corta vida, con un promedio que varía de uno a diez millones de años, y constituyen una pequeña minoría de las estrellas de la galaxia. La mayoría de las

estrellas, entre ellas el Sol, son menos brillantes, tienen tiempos de vida de miles de millones de años y se distribuyen de manera uniforme por la galaxia.

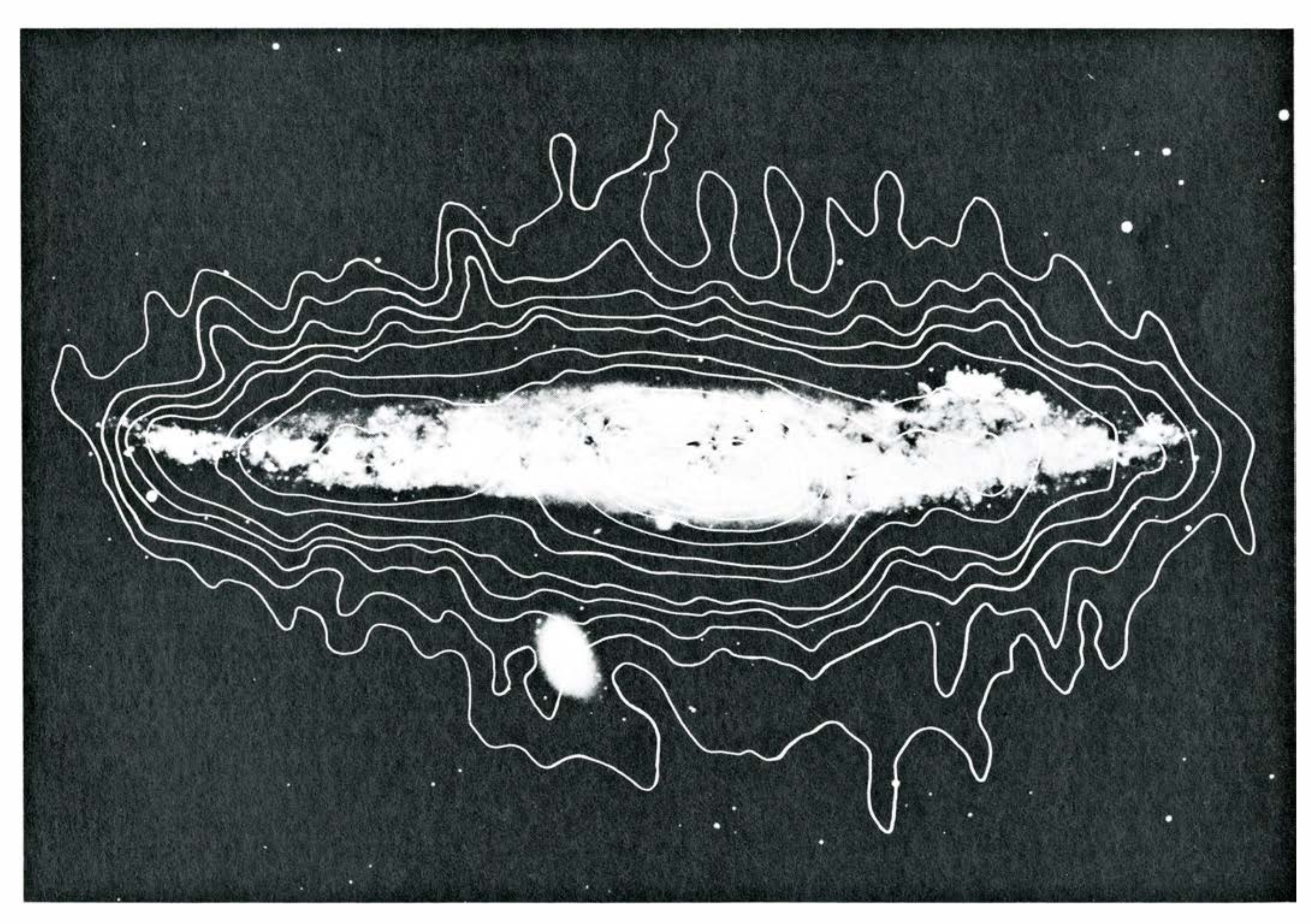
Gran parte del gas de una galaxia espiral está concentrado cerca del plano central del disco galáctico. Las fuerzas gravitacionales ejercidas por las estrellas del plano central tienden a mantenerlo allí. El espesor de la capa de gas no llega al uno por ciento del diámetro del disco.

Aunque el disco del gas interestelar ocupa un volumen pequeño, comparado con el de la galaxia considerada como un todo, es el escenario de abundante actividad de gran significado astronómico. Según una hipótesis reciente, el gas del disco se comprime hacia los brazos espirales por las fuerzas gravitacionales ejercidas por toda la materia que rota en el disco. Si en una región particular del disco la densidad del gas aumenta lo suficiente, la atracción gravitacional mutua de sus propios átomos o moléculas conlleva el que empiecen a reunirse. El proceso puede motivar la formación de nubes oscuras y densas en las cuales se originen estrellas. El gas puede ser comprimido también por la onda de choque derivada de la explosión de una supernova, que es el último estado en la evolución de una estrella masiva. Además, el gas del disco posee un campo magnético que puede servir para mantener las relaciones espaciales entre algunas de las estructuras de la galaxia. Este campo puede tener lazos que salgan hacia fuera, desde el plano central, y se introduzcan en la corona galáctica.

Fue a comienzos de los años 50 cuando se empezó a tener en cuenta el alcance y el significado del gas en el disco central. Las mejores pruebas de su existencia llegaron a través de observaciones realizadas con radiotelescopios. La mayor parte del gas del disco es hidrógeno, del que aproximadamente la mitad está en su forma atómica (H) y la otra mitad en la forma molecular (H_2).

Igual que los electrones de otros átomos, el único electrón de un átomo de hidrógeno no puede girar en cualquier órbita alrededor del núcleo, sino que debe atenerse estrictamente a ciertas pautas o estados específicos. Los estados difieren según la cantidad de energía que el electrón posee en cada uno de ellos. La transición de un electrón desde un estado hasta otro de mayor energía requiere que se le suministre al átomo una cantidad de energía específica, cantidad que es la misma que se libera cuando el electrón regresa a su estado original.

La energía que se necesita para cambiar el estado de un electrón puede provenir de varias fuentes, entre las que se incluyen las colisiones entre átomos y la radiación electromagnética de estrellas cercanas. Si la energía está en forma de radiación, se requiere que tenga una longitud de onda específica. La razón es que la energía necesaria para cambiar el estado de un electrón es fija. La energía de cualquier forma de radiación es inversamente proporcional a la longitud de onda; a mayor energía, me-



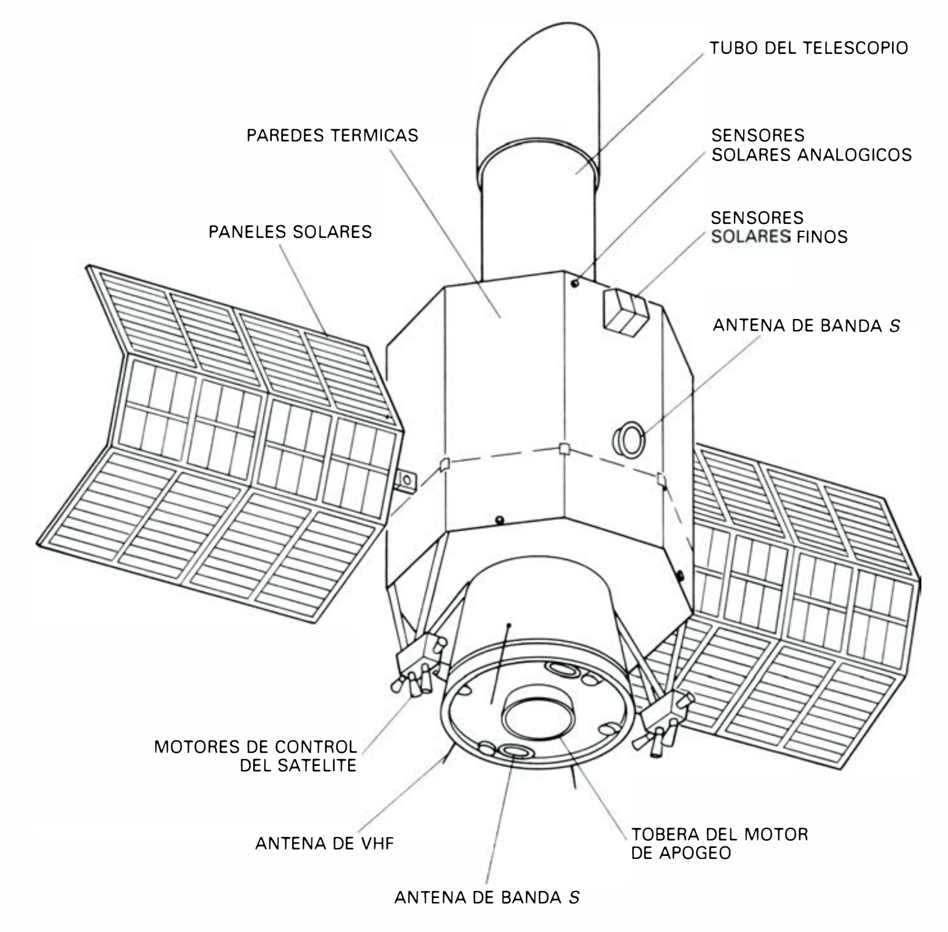
MAPA DE RADIOEMISION, superpuesto a escala sobre una fotografía de una galaxia espiral vista de perfil. Constituye una prueba indirecta de la existencia de una corona de gas caliente alrededor de la galaxia. La radioemisión no proviene de los átomos de gas, sino de los electrones libres que giran en espiral alrededor de líneas de fuerza del campo magnético de la galaxia. La galaxia es la NGC 4631. La radioemisión fue obtenida a una frecuencia de 1412 megahertz, por Renzo Sancisi del Laboratorio Kapteyn en Holanda y sus colegas, con el radiotelescopio de síntesis Westerbork. La radiointensidad decrece con la distancia a partir del plano central de la galaxia; los contornos se extienden 30.000 años-luz a partir del plano. Observaciones realizadas por Adrian Webster, de la Universidad de Cambridge, indican que las radioemisiones pueden originarse en una región que se extiende a unos 30.000 años-luz de nuestra propia galaxia. Esta región tiene aproximadamente la misma extensión que la nube de gas detectada en longitudes de onda ultravioleta.

nor longitud de onda. Por tanto, solamente radiación de una cierta longitud de onda puede llevar a cabo una transición electrónica determinada. Puesto que se libera igual cantidad de energía cuando el electrón vuelve a su estado inicial, la radiación emitida tendrá la misma longitud de onda que la radiación causante de la primera transición. Las longitudes de onda absorbidas o emitidas cuando la radiación pasa a través de una nube de gas son las que proporcionan información sobre los átomos que componen el gas.

En el caso del gas frío que está en el disco galáctico, son las colisiones entre átomos de hidrógeno las que proporcionan la energía necesaria para cambiar el estado de un electrón. A causa de la baja temperatura del gas, dichas colisiones sólo originan las transiciones electrónicas menos energéticas. Por lo tanto, cuando el electrón vuelve al estado de energía más bajo, la radiación emitida tiene una longitud de onda alta: 21 centímetros, que está en el rango de las ondas de radio.

Se han usado radiotelescopios operando con radiación de 21 centímetros para detectar el gas de discos situados a grandes distancias del Sol (que se encuentra a unos 25.000 años-luz del centro de la galaxia). Se ha detectado hidrógeno a distancias del orden de los 100.000 años-luz; puesto que el disco galáctico tiene aproximadamente 100.000 años-luz de diámetro, tal distancia implica que el gas está presente en todas sus partes.

Es más, las observaciones de los radiotelescopios indican que el gas del disco participa en la rotación galáctica, alrededor de un eje perpendicular al plano central del disco. La rotación es tal que la materia que dista más de 10.000 años-luz del centro galáctico se mueve en una órbita con una velocidad de unos 220 kilómetros por segundo. Considerando el diámetro del disco galáctico, el gas de la periferia habrá dado sólo unas 25 vueltas alrededor del centro de la galaxia desde que ésta se originó, hace 10.000 millones de años.



INTERNATIONAL ULTRAVIOLET EXPLORER (IUE), un satélite puesto en órbita en 1978; fue diseñado para observaciones en longitudes de onda ultravioletas. El satélite describe ahora una órbita geosíncrona sobre América del Sur, es decir, conserva una posición estable sobre el continente. Es un proyecto conjunto de la NASA, de la ESA y del BSRC. El IUE está dotado de un telescopio y de un espectrógrafo. Con el telescopio apuntando a una estrella distante, el espectrógrafo mide la intensidad de la radiación ultravioleta, incluyendo las longitudes de onda específicas que sufren absorción cuando la radiación procedente de la estrella atraviesa una masa de gas. Estas medidas dan información de la composición, temperatura y velocidad del gas. La energía para los instrumentos del satélite la proporcionan paneles solares. Los sensores solares permiten ajustar el posicionamiento del satélite respecto al Sol. Las órdenes terrestres son recibidas por una antena de VHF; una antena de banda *S* envía los datos a la Tierra.

Se han utilizado métodos similares para la investigación de otros componentes del gas del disco, diferentes del hidrógeno. Cuando se dirige el telescopio a una estrella lejana, la radiación emitida por ésta debe pasar a través del gas antes de llegar al telescopio. La emisión de la estrella suele consistir en radiación de muy diferentes longitudes de onda y, al pasar a través del gas, algunas longitudes de onda específicas serán absorbidas. Como hemos visto, las longitudes de onda absorbidas poseen la cantidad de energía precisa para elevar de un estado a otro los electrones de los átomos del gas. Las longitudes de onda absorbidas se registran en el espectrógrafo como líneas oscuras que representan descensos bruscos de la radiación en el espectro de longitudes de onda.

Las líneas de absorción no sólo dan información sobre la composición del gas interestelar, sino también, teniendo en cuenta el efecto Doppler, sobre su velocidad. Si el gas se está alejando del observador, la absorción tiene lugar a longitudes de onda ligeramente más altas. Este desplazamiento hacia el rojo es directamente proporcional a la velocidad del gas a lo largo de la línea de visión, gracias a lo que puede calcularse fácilmente la velocidad.

El espectro de las líneas de absorción indica que el gas interestelar incluye muchos elementos además del hidrógeno. Algunos elementos se encuentran principalmente en las partículas sólidas del polvo interestelar. Las proporciones relativas de los elementos dentro del conjunto de polvo y gas son probablemente similares a aquellas que hay en la atmósfera del Sol (aunque ésta sea principalmente de hidrógeno, incluye más de 50 elementos diferentes).

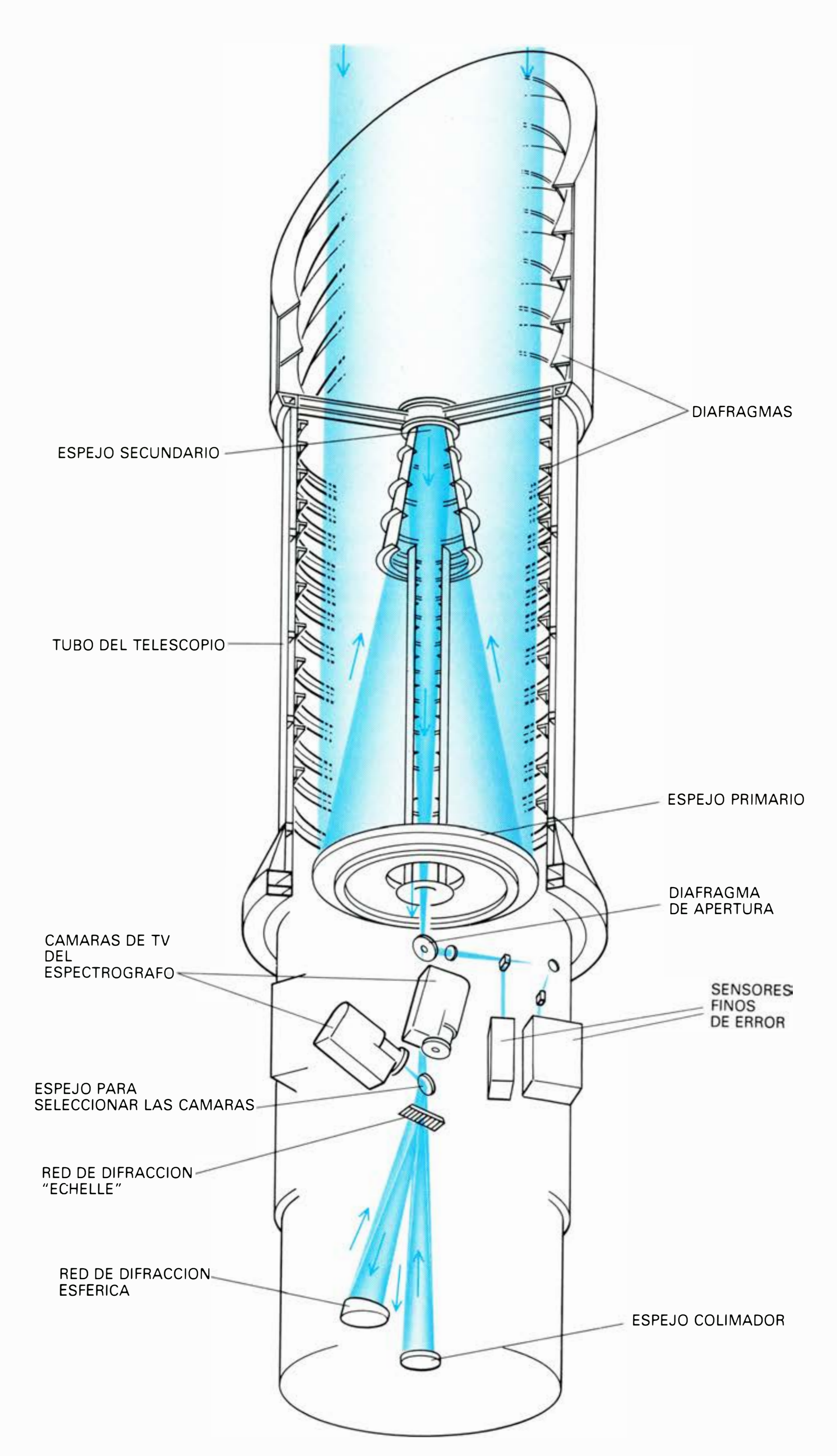
Cada átomo de gas interestelar puede adoptar diferentes estados de ionización. Un ion es un átomo que tiene más, o menos, electrones que en su estado neutro (no ionizado). La mayoría de los iones del gas interestelar están cargados positivamente porque se han formado quitando electrones a átomos neutros. Los electrones pueden ser expulsados de un átomo por los mismos procesos que los hacen saltar de un estado de energía a otro, a saber, las colisiones con otros átomos y la exposición a radiación electromagnética.

El grado de ionización depende de cuántos electrones se hayan extraído del átomo. Por ejemplo, si se extrae un

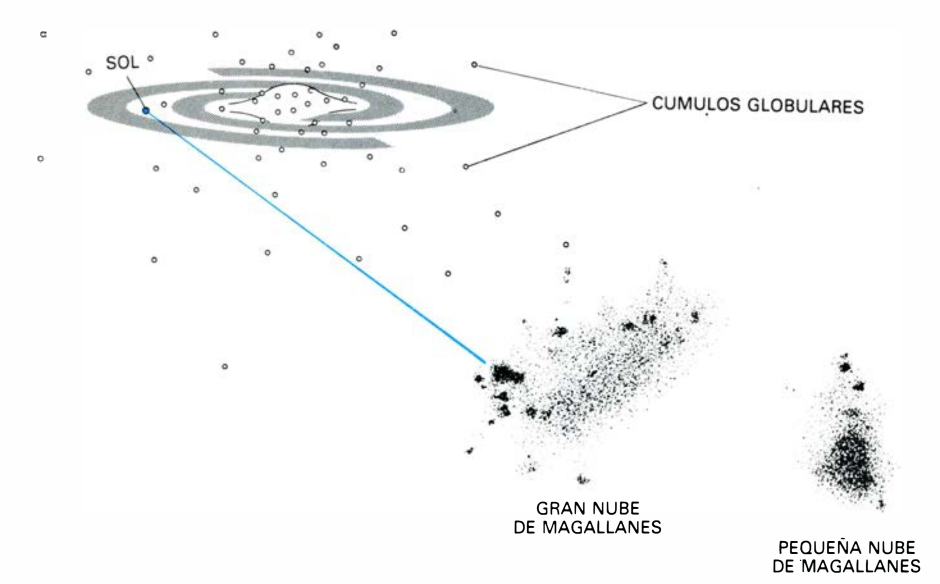
solo electrón de un átomo de carbono neutro del medio interestelar, el átomo adquiere una unidad de carga positiva y se dice que está ionizado una vez. Si luego se extrae otro electrón, el átomo, con dos unidades de carga positivas, estará ionizado dos veces. En espectrometría atómica, el átomo de carbono neutro se designa por C I, el átomo de carbono ionizado una vez C II, C III el ionizado dos veces, etcétera. Gran parte del hidrógeno del gas interestelar es H I; las grandes nubes interestelares de hidrógeno neutro se conocen como regiones H I. Sin embargo, cerca de las estrellas calientes los fotones energéticos (cuantos de radiación) extraen el electrón del átomo de hidrógeno; y así se forma una región H II.

Los elementos del gas interestelar más pesados que el hidrógeno están sometidos también a la influencia de la radiación de estrellas cercanas. Para extraer un electrón de cada uno de estos átomos se requiere una cantidad determinada de energía; a esta cantidad se le llama energía de ionización. Las diferencias en energía de ionización dan como resultado diferentes grados de ionización de los elementos más pesados según las condiciones del gas interestelar.

Como en un átomo neutro, en un ion cada electrón se mueve siguiendo unas órbitas fijas o específicas. La longitud de onda de la radiación absorbida en transiciones electrónicas puede suministrar una considerable información acerca de los iones. En la década de los 50, Guido Münch, del Instituto de Tecnología de California, trabajó con el telescopio Hale de 5 metros de Monte Palomar y proporcionó resultados importantes sobre el gas interestelar. Münch dirigió el telescopio hacia estrellas muy por encima del plano galáctico. El examen de los espectros indicaba absorción debida al Na (sodio) I y al Ca (calcio) II. Las líneas de absorción eran bastante complejas; mostraban la presencia de nubes de gases con altas velocidades. Desde entonces, los astrónomos han estudiado a fondo estas nubes de alta velocidad que observó Münch y han centrado su trabajo en la línea de emisión de 21 centímetros del hidrógeno. La existencia de nubes de gas a grandes distancias del plano galáctico conlleva varios problemas. El primero está relacionado con las fuerzas gravitacionales ejercidas por las estrellas del plano galáctico. Para que una nube de gas se eleve por encima del plano debe vencer estas fuerzas. El hecho de que las nubes de alta velocidad se hayan



LA INSTRUMENTACION DEL IUE puede verse en esta sección del telescopio. Cuando el telescopio está apuntando a una estrella, los deflectores de su interior impiden que la luz procedente del Sol y de la Tierra entre en el espectrógrafo. El espejo primario tiene 45 cm de diámetro. La radiación que incide sobre el primario es reflejada a un espejo secundario situado en lo alto del chasis y enviada al compartimiento del espectrógrafo a través de una apertura en el espejo primario. Montados detrás del telescopio hay dos sistemas espectrográficos. Uno cubre el rango de longitudes de onda de 1150 a 2000 angstrom y el otro de 1900 a 3200 angstrom. Ambos sistemas son similares; sólo se muestra el correspondiente al de las longitudes de onda cortas. La apertura detrás del espejo principal dirige parte del haz a los sensores de ajuste fino de error, que mantienen el telescopio dirigido al blanco. La mayor parte del haz pasa al espejo colimador a través de la apertura. El haz colimado es reflejado por una red de difracción "echelle", que lo descompone en sus componentes espectrales. La red esférica descompone al haz en órdenes espectrales y los envía a una de las dos cámaras de televisión sensibles al ultravioleta. Las cámaras dan una imagen del espectro proporcionado por el espectrógrafo. La imagen de televisión se digitaliza y se envía a la Tierra.



LAS NUBES DE MAGALLANES son dos pequeñas galaxias cercanas a la nuestra. La Gran Nube de Magallanes está situada a unos 160.000 años-luz del Sol y la Pequeña Nube a unos 200.000 años-luz. Las estrellas calientes de ambas galaxias se usaron como fuente de radiación para el estudio de la corona galáctica con el IUE. La absorción indica la presencia de gas a temperaturas comprendidas entre 10.000 y 200.000 grados K. Otros datos sugieren que también hay gas a una temperatura de un millón de grados.

alejado tanto del plano galáctico indica que debieron haber tenido velocidades muy altas cuando dejaron el disco central de la galaxia.

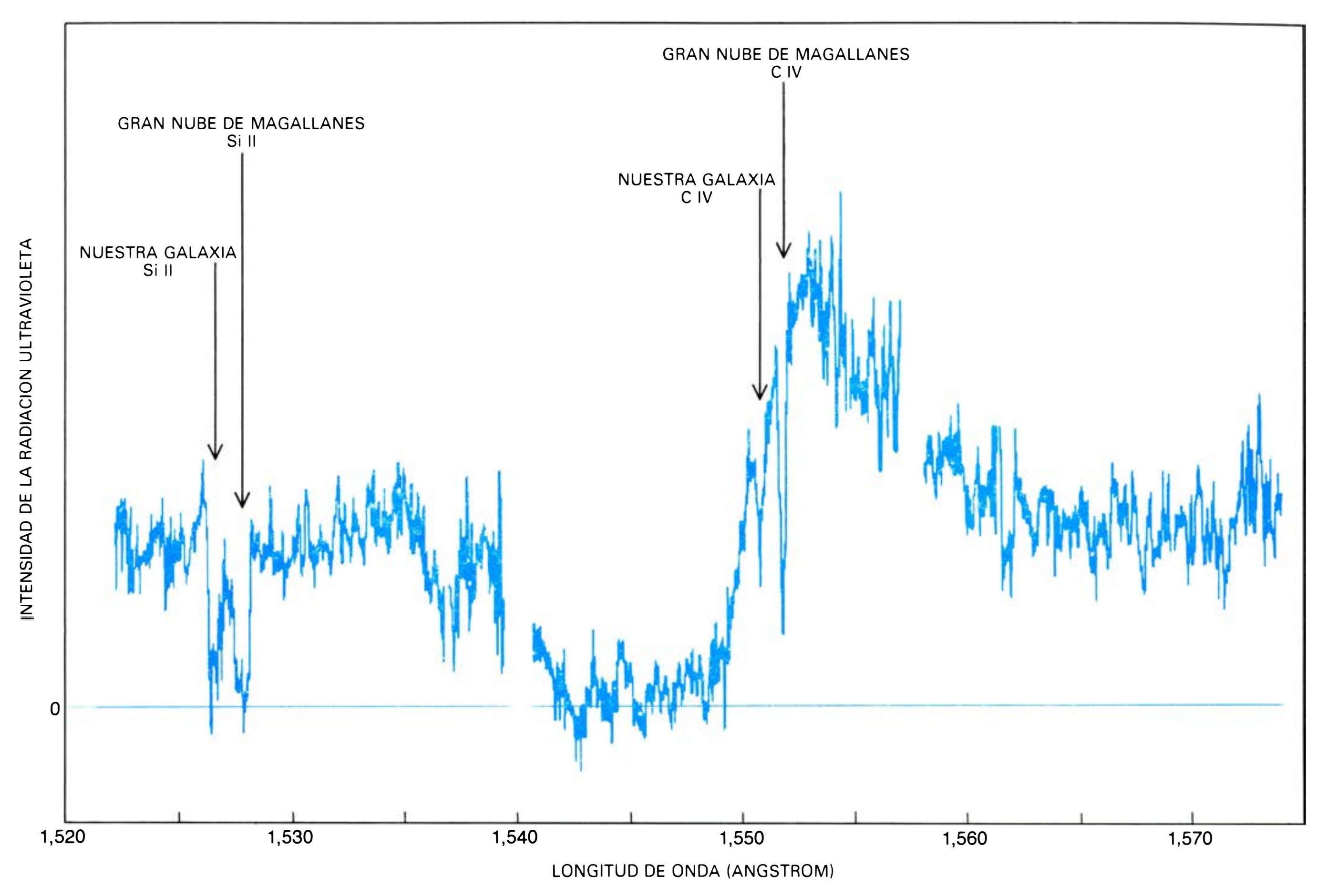
Había otro problema que resultaba, de alguna manera, más extraño. Si el espacio que rodea a una nube de alta velocidad estuviese vacío, la nube se expandiría, se dispersaría y desaparecería. La permanencia de las nubes indica que algunas fuerzas las mantienen juntas. El candidato más probable que hay en el espacio interestelar para ser tal fuerza es la presión ejercida por el gas circundante a las nubes de alta velocidad. En 1956 Lyman Spitzer Jr., de la Universidad de Princeton, propuso que la galaxia está rodeada por una corona de gas caliente y que es el gas coronal el que mantiene unidas a las nubes de alta velocidad.

Spitzer infirió la existencia del gas coronal caliente a partir de los datos recogidos por Münch y otros sobre las nubes de alta velocidad. Discutiendo la posibilidad de probar la existencia del gas coronal de una forma más directa, Spitzer reparó en que la presencia de gas coronal sólo podría quedar indicada por la absorción de radiación a una longitud de onda de 2000 angstrom o menos, que pertenece al rango ultravioleta del espectro electromagnético.

A la temperatura predicha para el gas, en la parte más caliente de la corona, la mayoría de los átomos habrían perdido muchos electrones; la gran temperatura del gas aumenta la energía cinética de los átomos que colisionan y, en consecuencia, aumenta la probabilidad de que uno de ellos pierda un electrón. Entre los átomos altamente ionizados se incluyen C IV, Si (silicio) IV, N (nitrógeno) V y O (oxígeno) VI. Todos estos iones muestran líneas de absorción a longitudes de onda más cortas que 2000 angstrom. Además, las líneas de absorción de los abundantes átomos de carbono, nitrógeno, oxígeno, magnesio, aluminio, azufre, silicio, níquel, hierro y zinc, en sus estados neutros o ionizados una sola vez, se hallan también en el ultravioleta.

Cuando Spitzer publicó su trabajo, que se ha convertido en clásico, era imposible verificar la existencia de la corona; las observaciones necesarias tendrían que haber sido realizadas desde la superficie de la Tierra, es decir, por debajo de nuestra atmósfera, que es muy absorbente en el ultravioleta. Con el fin de reunir pruebas experimentales más directas es necesario una plataforma observacional fuera de la atmósfera. Los satélites la han propor-

ESPECTROGRAMA "ECHELLE", realizado con los instrumentos del IUE. Es una imagen de televisión de parte del espectro. El espectro mostrado corresponde a la estrella HD/38282 en la Gran Nube de Magallanes. Incluye radiación de longitudes de onda de 1200 angstrom (*parte superior derecha*) a 2000 angstrom (*abajo a la izquierda*). Las redes del espectrógrafo descomponen la radiación en órdenes de unos 15 angstrom de ancho. Cada línea diagonal oscura en este positivo corresponde a un orden determinado. El espacio en blanco entre algunos órdenes indica que la radiación de una determinada longitud de onda ha sido absorbida por el gas coronal. Las manchas oscuras son debidas a partículas de rayos cósmicos. Los puntos blancos son pautas para la corrección de la distorsión geométrica en la imagen de la televisión.



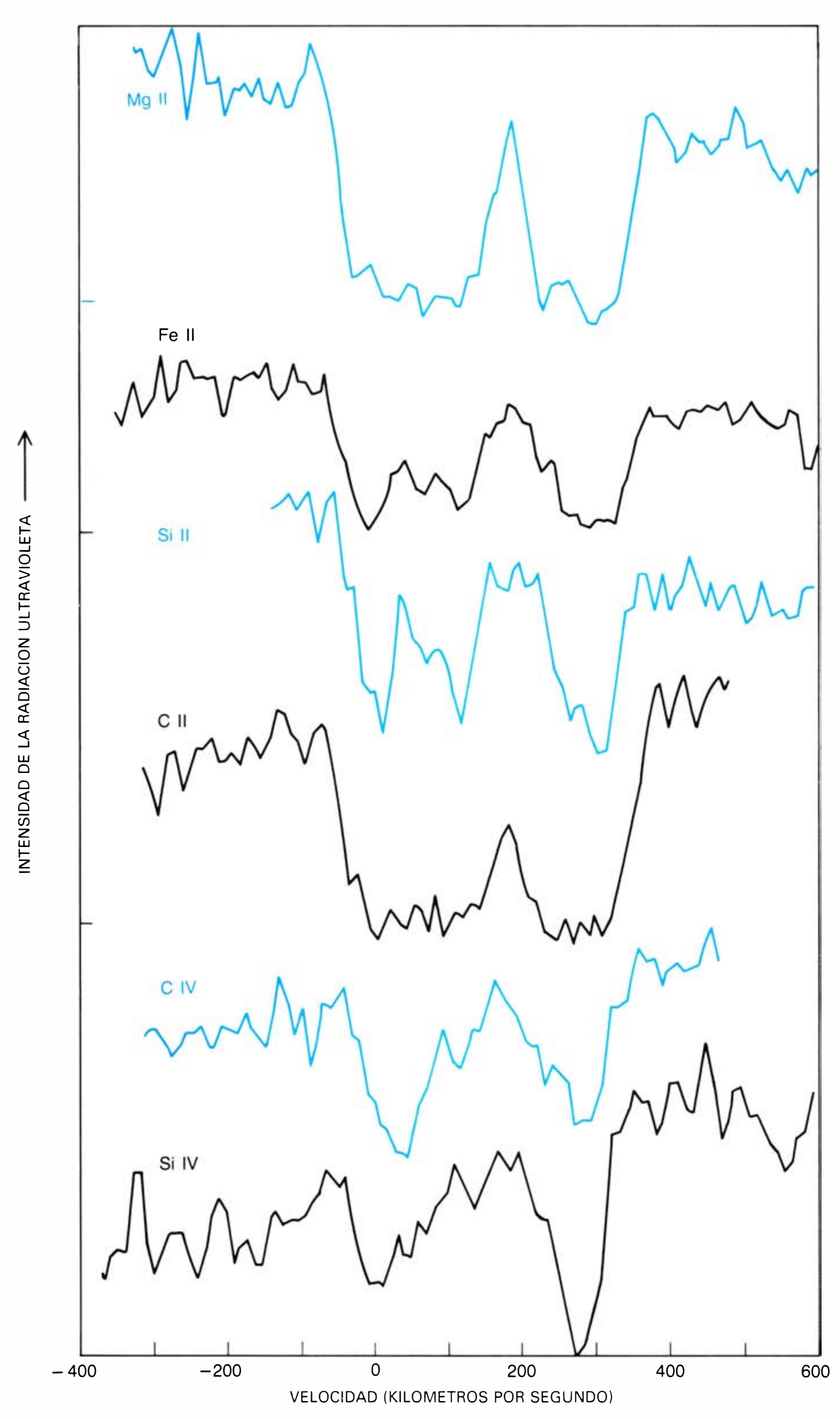
ABSORCION POR LA CORONA de nuestra galaxia y la corona de la Gran Nube de Magallanes. La figura es un gráfico de la intensidad de radiación detectada por el IUE en función de la longitud de onda. Corresponde a tres órdenes del espectrograma de la estrella HD/38282 de la página anterior; los órdenes están separados por espacios. La absorción debida al gas coronal aparece en la gráfica como canales profundos y estrechos. Cada ion del gas absorbe radiación de una determinada longitud de onda. Hay dos iones que absorben radiación con longitudes de onda comprendidas en los órdenes mostrados: el átomo de silicio con un electrón menos (Si II) a unos 1527 angstrom y el átomo de carbono con tres electrones menos (C IV) a unos 1550 angstrom. La absorción no sólo se debe al gas coronal sino también al gas del plano central de una y otra galaxia. Debido al efecto Doppler, la longitud de onda de la absorción por la corona de la galaxia de la Gran Nube de Magallanes es mayor que la de la absorción por la corona de nuestra propia galaxia. La depresión y el pico del orden intermedios son debidos a la materia emitida por la estrella; se le llama perfil P Cygni. (Ilustración de Walken Graphics.)

cionado. Los primeros satélites con instrumentos capaces de detectar la absorción en la parte ultravioleta del espectro fueron enviados al espacio por la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) al comienzo de los años setenta; se les conoció como los Observatorios Astronómicos Orbitales (OAO). El segundo observatorio de la serie, que fue lanzado con éxito, *Copernicus,* estuvo operando desde 1972 hasta el final del programa OAO en 1980. Llevaba equipo experimental diseñado específicamente para el estudio de las líneas de absorción del gas interestelar en el ultravioleta. El proyecto *Copernicus* estuvo dirigido por Spitzer, quien también supervisó el diseño de sus instrumentos.

De los muchos hallazgos hechos con el *Copernicus,* uno de los más importantes fue la observación de la absorción del O VI en el medio interestelar cercano a estrellas vecinas del Sol, trabajo que realizaron Edward B. Jenkins y sus colegas de la Universidad de Princeton. La presencia de O VI indica que este gas interestelar tiene una temperatura altísima. William L. Kraushaar y sus colaboradores, de la Universidad de Wisconsin en Madison, también llegaron a la conclusión de que los componentes del medio interestelar cercano al Sol estaban extremadamente calientes como resultado de sus estudios de la emisión de rayos X.

Los componentes calientes del medio interestelar, que fueron descubiertos en los años setenta, han sido objeto de muchos trabajos recientes, tanto teóricos como experimentales. La mejor hipótesis actual es la de que el gas se calienta por ondas de choque generadas en la explosión de supernovas. En una galaxia espiral, la frecuencia de estas dramáticas explosiones es de una cada 100 años aproximadamente.

Los últimos trabajos tienden a apoyar la hipótesis de Spitzer de que las nubes de alta velocidad se mantienen juntas por la presión ejercida por las nubes de gas caliente que las rodean. Sin embargo, el *Copernicus* no tenía instrumentos suficientemente sensibles para la medida de la absorción de la radiación que viene de estrellas lejanas separadas del plano de la galaxia. Medidas de esta clase son necesarias para detectar la corona galáctica. Hasta el lanzamiento del *International Ultraviolet Explorer*, en enero de 1978, no se pudo estudiar la corona activamente. El IUE está administrado conjuntamente por NASA, ESA (Agencia Espacial Europea) y el British Science Research Council. Ha servido para observar muchos y muy diversos fenómenos, además de la corona galáctica. Es un satélite geosíncrono: su período de rotación alrededor de la Tierra es síncrono con el período de rotación terrestre, con el fin de que el satélite permanezca estacionario encima de Sudamérica a unos 40.000 kilómetros de las estaciones de control de Europa y Estados Unidos. El satélite lleva un telescopio y un espectrómetro. El haz de ra-



LA VELOCIDAD DEL GAS de la corona galáctica se puede calcular a partir de la longitud de onda a la que tiene lugar la absorción, por medio de las fórmulas que describen el efecto Doppler. La intensidad de la radiación detectada se ilustra en función de la velocidad del gas absorbente. La figura muestra lo que sucede con seis iones del gas coronal; la fuente origen fue la estrella HD/36402 de la Gran Nube de Magallanes. Las líneas pequeñas en el eje vertical indican el nivel cero de intensidad. La Gran Nube tiene una velocidad aparente de 270 kilómetros por segundo alejándose del Sol, debido principalmente a la rotación del Sol alrededor del centro de nuestra galaxia. Se muestra, para cada ion, la fuerte absorción debida a un gas estacionario y a un gas con velocidad de 270 kilómetros por segundo; esto corresponde a un gas cerca del Sol y a otro en la Gran Nube. Se muestra asimismo la absorción para gases con velocidades intermedias a las anteriores. Si realizamos hipótesis sobre cómo se mueve el gas coronal en nuestra galaxia, se puede calcular la posición del gas a partir de su velocidad. El hierro y el silicio ionizados una vez (Fe II, Si II) se originan en nubes frías. La absorción debida a estos iones a velocidades de 70 y 120 kilómetros por segundo indica la presencia de nubes frías a distancias intermedias del plano central de nuestra galaxia. Los átomos de carbono y silicio ionizados tres veces (C IV y Si IV) se forman en gases calientes. La absorción debida a estos dos iones, a unos 175 kilómetros por segundo, indica que el gas tiene una temperatura aproximada de unos 100.000 grados K. a grandes distancias del plano galáctico.

diación ultravioleta que emerge del espectrómetro se dirige hacia cámaras de televisión sensibles a la radiación ultravioleta, las cuales crean una imagen del espectro que es transmitida con posterioridad a la superficie terrestre.

El poder de resolución del espectrómetro puede variar a voluntad del observador situado en la superficie. En uno de sus rangos, pueden detectarse detalles de siete angstrom de ancho espectral. En otro se puede detectar 0.1 angstrom de ancho. Una gran resolución espectral es esencial para el estudio de la absorción debida a la corona galáctica.

A fin de examinar regiones de la corona lejos del plano de la galaxia, apuntamos el telescopio del IUE hacia una estrella de la Gran Nube de Magallanes. La Gran Nube y su vecina, la Pequeña Nube de Magallanes, son pequeñas galaxias cercanas a la nuestra, situadas a unos 160.000 años-luz del Sol. A esa distancia, las estrellas de las Nubes de Magallanes son tan débiles que se requirió una exposición de 6 horas para obtener un espectrograma de gran resolución.

La Gran Nube de Magallanes tiene una velocidad aparente de 270 kilómetros por segundo alejándose del Sol. Gran parte de esta velocidad se debe realmente al movimiento orbital del Sol alrededor del centro de nuestra propia galaxia. Cuando examinamos los espectros de absorción obtenidos por el IUE, encontramos una estructura compleja que daba prueba de la absorción debida a nubes de gases con velocidades completamente diferentes. Hallamos pruebas de absorción a una velocidad nula con respecto al Sol y también a velocidades de 270 kilómetros por segundo. Las líneas de absorción se debían claramente al gas cercano al Sol y a gas perteneciente a la Gran Nube de Magallanes.

Fue una sorpresa encontrar también una absorción pronunciada debida a gas con una velocidad intermedia. Las longitudes de onda de absorción implicaban que sus iones responsables eran C II, Mg (magnesio) II, y Si II; tales clases de iones se forman a temperaturas moderadas. Y más intrigante todavía fue el hallazgo de fuertes líneas de absorción debidas al C IV y al Si IV. Estos iones se forman a una temperatura de unos 100.000 grados Kelvin, de modo que su presencia confirma la idea de una corona galáctica caliente.

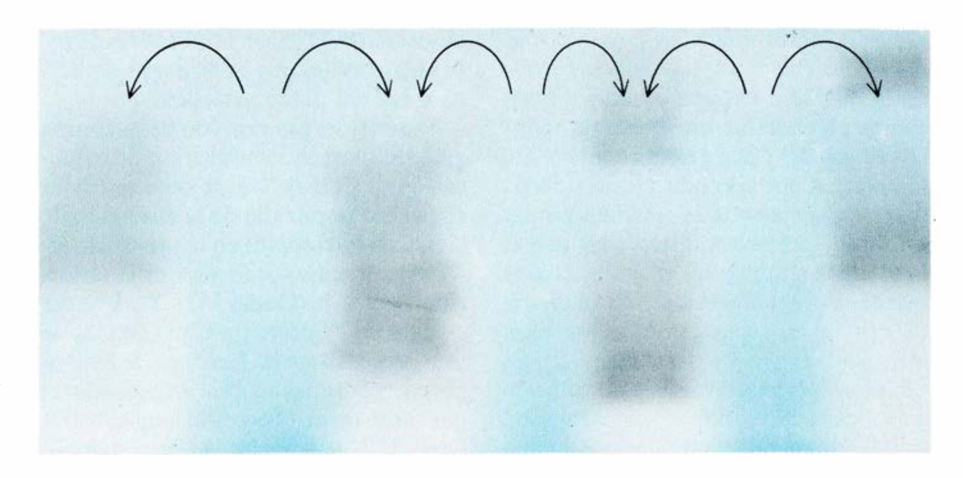
Para obtener un conocimiento más detallado de las líneas de absorción, la imagen de televisión del espectro ultravioleta se convierte en una gráfica de

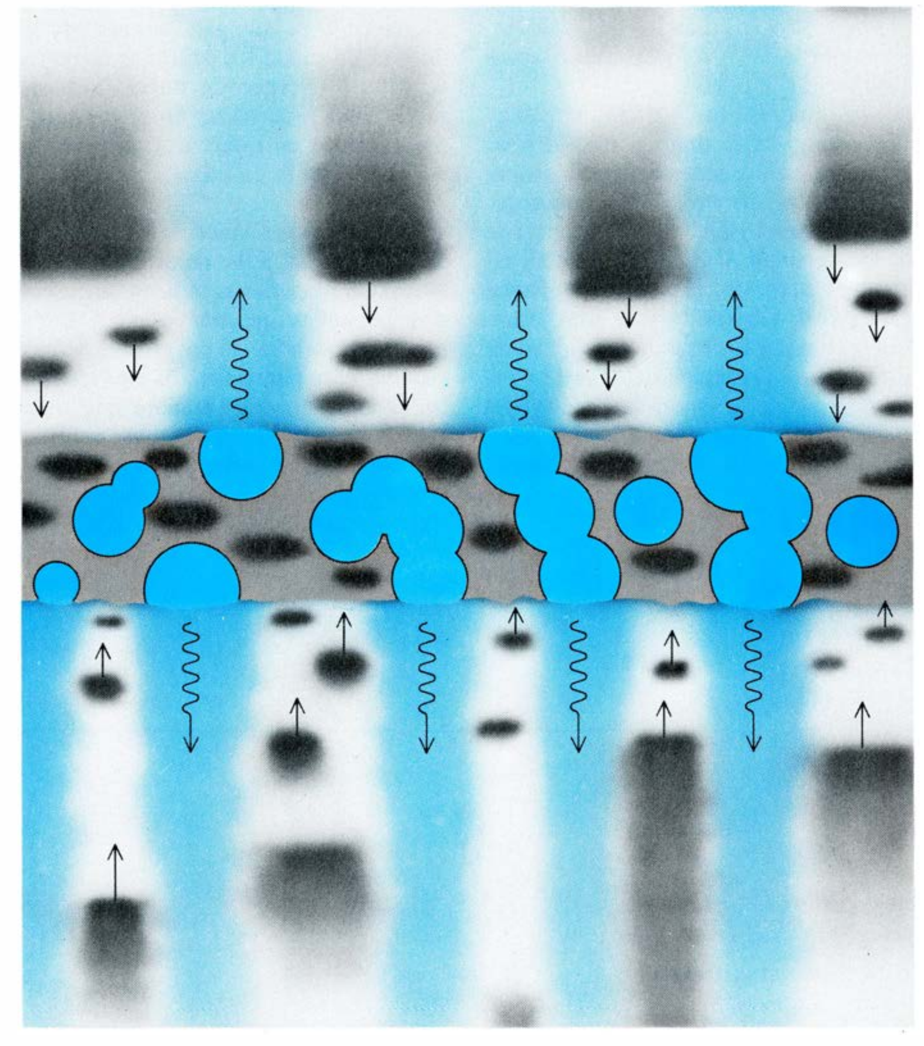
intensidad de radiación para cada longitud de onda. Aplicando las fórmulas relacionadas con el efecto Doppler, se calcula fácilmente la velocidad del gas responsable de la absorción. Añadiendo ciertas suposiciones, puede estimarse la distancia de una nube midiendo su velocidad. Tal manera de proceder permite la determinación de la posición de las nubes calientes y frías de la corona galáctica.

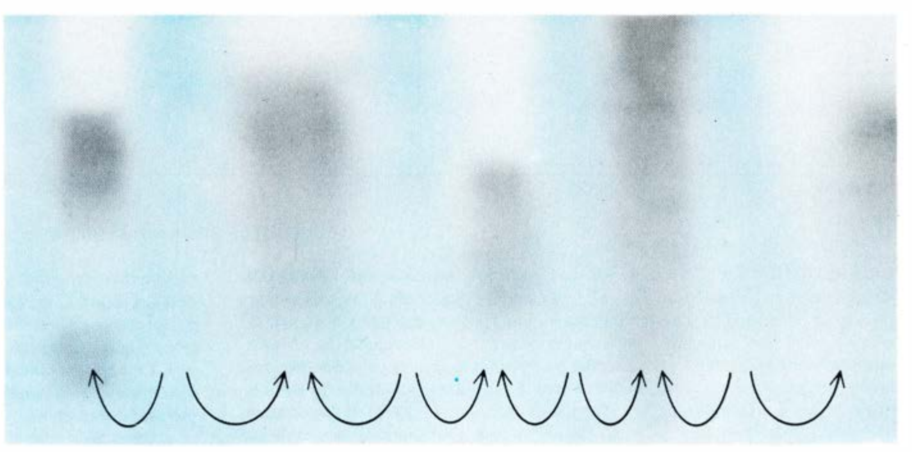
Puesto que el gas del disco galáctico rota con la galaxia a 220 kilómetros por segundo, ésta es la máxima velocidad aparente, con respecto al Sol, que una nube de gas interestelar puede tener en nuestra galaxia. No obstante, el movimiento de la mayoría de los puntos de la galaxia no se dirige precisamente en dirección al Sol. La componente de la velocidad en la dirección del Sol varía según la distancia al mismo. El Sol también se mueve alrededor del centro galáctico y, por tanto, la velocidad aparente de un objeto será la diferencia entre la velocidad del Sol y la velocidad del objeto a lo largo de la línea de visión. La relación entre velocidad y distancia hace posible el cálculo de una cantidad conociendo la otra.

En la línea de visión de la estrella catalogada HD/36402 de la Gran Nube de Magallanes la velocidad máxima que un objeto de nuestra galaxia puede tener es de 175 kilómetros por segundo alejándose del Sol. Cuando apuntamos el telescopio del IUE a HD/36402, observamos fuerte absorción de C II a esa velocidad. También se observó absorción a velocidades mayores correspondientes a gas cercano a la Gran Nube. Encontramos pruebas de átomos altamente ionizados de C IV y Si IV a distancias muy largas, de hasta 30.000 años-luz. Los perfiles de absorción del C IV y Si IV sugieren que sus densidades decrecen en proporción directa a la distancia; la densidad parece reducirse en un factor de tres cada 10.000 años-luz.

Nuestros resultados sugieren que hay







"FUENTE GALACTICA", en una sección transversal muy esquemática de la corona y del disco galáctico. El denso gas del disco tiene unos 500 años-luz de grosor. El gas caliente del disco se eleva hasta una altura aproximadamente igual a 50 veces la anchura del disco. El gas más frío desciende hacia el disco en forma de nubes, completando así la fuente. Las explosiones de supernovas calientan parte del disco de gas a temperaturas cercanas a un millón de grados Kelvin; tales explosiones tienen lugar en nuestra galaxia aproximadamente una vez cada 100 años. El gas caliente se expande hacia el exterior del disco, alejándose del plano central. A medida que ocurre esto, el gas empieza a enfriarse y a condensarse, con lo cual desciende hacia el disco. Y eso es lo observado con el IUE en la forma de nubes de gas coronal frío. Cuando éstas llegan al plano galáctico, entran a formar parte del gas frío del disco y el ciclo vuelve a empezar.

nubes de gases ionizados muy alejadas del plano galáctico. Las nubes están a tanta distancia del plano que sus posiciones plantean ya un problema teórico. El gas del disco galáctico gira a 220 kilómetros por segundo a causa de las fuerzas gravitacionales ejercidas por las estrellas. Las nubes observadas con el IUE distan tanto del plano galáctico que cabe preguntarse si la fuerza ejercida por las estrellas es suficiente para mantener el gas de las nubes lejanas orbitando alrededor del eje de rotación galáctico a la misma velocidad que el gas del disco galáctico. Si el gas lejano no rotara a la misma velocidad que el gas del disco, los cálculos de las distancias a partir de las velocidades no serían válidos.

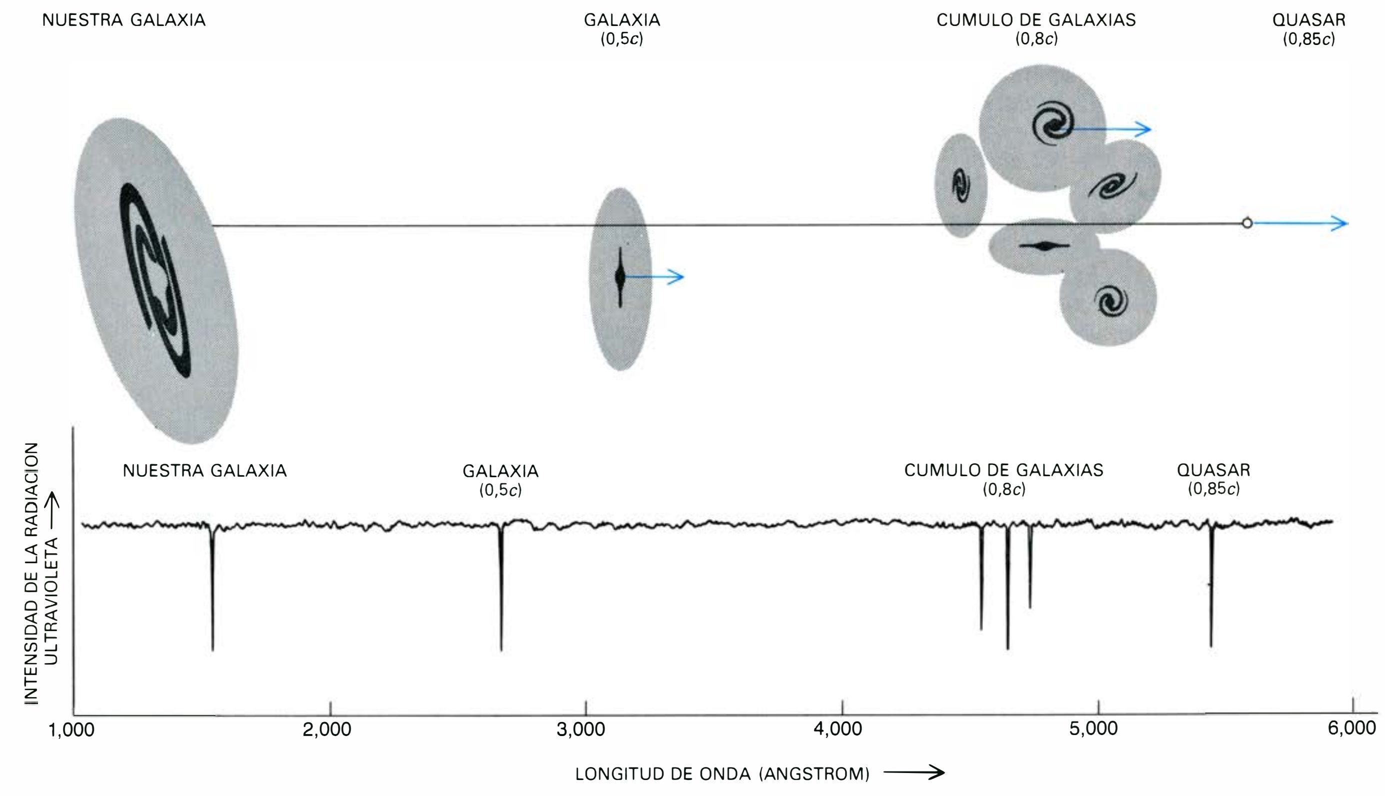
Sin embargo, otros trabajos realizados con el IUE tienden a confirmar nuestras estimaciones sobre la extensión del gas coronal. G. E. Bromage, A. H. Gabriel y Dennis W. Sciama, de la Universidad de Oxford, y, más recientemente, Max Pettini, del Royal Greenwich Observatory, y Kim West, del University College de Londres, han estudiado la absorción del C IV a lo largo de la línea de visión de estrellas del halo galáctico que están a 10.000 años-luz de distancia. Encontraron fuerte absorción del C IV en la dirección de todas las estrellas que están a más de 3000 años-luz del plano galáctico.

También el gas más frío de la corona galáctica parece estar distribuido extensamente. Con el IUE se detecta mejor el gas frío por medio de la absorción de C II. Con telescopios en la superficie terrestre, el mejor indicador es la absorción de Ca II. Donald G. York y sus colegas de Princeton y Chris Blades de la Agencia Espacial Europea, trabajando en colaboración con investigadores que usaban el telescopio angloaustraliano de Nueva Gales del Sur, han observado absorción de Ca II a grandes distancias del plano galáctico, ampliando de este modo los primeros trabajos de Münch. Numerosas nubes frías parecen estar incrustadas en el gas coronal caliente, en diferentes direcciones del centro de la galaxia.

Exámenes detallados de las líneas de absorción a la velocidad de las Nubes de Magallanes indican que estas dos pequeñas galaxias pueden estar también rodeadas de envolturas de gas coronal muy parecidas a la de la nuestra. Nuestro trabajo sugiere que toda galaxia espiral o irregular tiene corona. No obstante, se necesitarán ulteriores investigaciones para confirmar esta hipótesis. Mientras tanto se están incorporando más detalles al modelo general que ya tenemos del gas de nuestra galaxia.

Ese modelo ha cambiado considerablemente en los últimos 25 años. Hasta hace 10 años se pensaba que el medio interestelar estaba constituido por dos componentes principales: gas frío y neutro entre las estrellas de los brazos espirales y gas templado e ionizado entre los brazos espirales. El haber detectado absorción de O VI y emisión de rayos X sugirió que, por el contrario, gran parte del espacio interestelar está lleno de gas altamente ionizado con una temperatura de un millón de grados Kelvin. Un gas a tal temperatura se enfría lentamente, de tal manera que, una vez que se ha calentado por la explosión de una supernova, permanece caliente. Una explosión posterior de otra supernova crearía ondas de choque que podrían viajar a través del gas caliente y mantenerlo ionizado.

Para Paul Shapiro y George B. Field, del Harvard College Observatory y del Smithsonian Astrophysical Observatory, el gas caliente no estaría confinado en el disco galáctico; tendería a expandirse fuera del disco y a salir del plano



EL ESPECTRO DE UN QUASAR (*dibujado esquemáticamente abajo*) **está desplazado fuertemente hacia el rojo; ello sugiere que el objeto se está alejando a gran velocidad de nuestra galaxia y, por ello, de acuerdo con la expansión general del universo, se encuentra a una gran distancia. Superpuestos en este espectro hay, sin embargo, grupos de líneas de absorción que muestran pequeños desplazamientos hacia el rojo. Estas anomalías se pueden explicar por la absorción de la radiación del quasar por parte de las coronas de galaxias que se encuentran entre aquél y nuestra propia galaxia** (*diagrama esquemático de arriba*)**. En el espectro de abajo hay seis líneas de absorción debidas al ion C IV. Este ion absorbe radiación a 1550 angstrom y se debe al gas presente en nuestra galaxia. La absorción del C IV cercana a 3000 angstrom y la comprendida entre 4000 y 5000 angstrom corresponden respectivamente a objetos con velocidades de 0,5 y 0,8 veces la velocidad de la luz** (*c*)**. La absorción a estas longitudes de onda puede deberse a las galaxias que se interponen entre el quasar y el observador. La absorción cercana al quasar aparece a unos 5400 angstrom; es decir, unas 0,85 veces la velocidad de la luz.**

central. La distancia recorrida desde el disco dependería de su temperatura y de las fuerzas gravitacionales ejercidas por las estrellas del plano central. Mientras el gas escapara, se enfriaría gradualmente y se haría más denso. Las nubes más densas comenzarían a descender para terminar apareciendo como regiones frías de la corona. Fueron Shapiro y Field quienes le dieron a este ciclo el nombre de fuente galáctica.

Otros investigadores han contribuido al esfuerzo de comprender los procesos que ocurren en la corona galáctica. Joel N. Bregman, de la Universidad de Nueva York, ha ampliado el trabajo de Spitzer construyendo un modelo para el movimiento "filtrado" del gas en la fuente. Donald P. Cox, de la Universidad de Wisconsin en Madison, ha analizado la estructura a gran escala del medio interestelar y su balance energético. Ambos investigadores obtuvieron resultados consistentes con la hipótesis de que la fuerza impulsora de la fuente es la explosión de supernovas. Si la hipótesis es correcta, el vigor de la fuente galáctica y la mezcla de gas caliente y frío en el disco dependerían de la frecuencia de las explosiones.

El gas detectado por el IUE a una temperatura de 100.000 grados Kelvin dista mucho de los gases más calientes de la corona. Es difícil determinar si el gas detectado mediante la absorción de C IV y Si IV es ascendente o descendente. Incluso es difícil asegurar si la temperatura atribuida al gas es correcta. En los gases densos, tales como los de la Tierra, al elevar la temperatura del gas se suministra energía cinética que se reparte rápidamente de modo uniforme entre los átomos, mediante colisiones. Como consecuencia de ello la temperatura del gas está muy relacionada con el grado de ionización.

Sin embargo, en gases muy tenues, tales como los de la corona galáctica, la relación entre temperatura y grado de ionización puede ser más débil. Las colisiones entre átomos y electrones pueden ser tan esporádicas que los cambios de temperatura no se difundan rápidamente por el gas. Además hay procesos, tales como la absorción de rayos X por el gas, que pueden afectar al grado de ionización. Por consiguiente, la presencia de tipos especiales de iones no tiene porqué indicar la temperatura precisa del gas como un todo.

El descubrimiento de la corona de nuestra galaxia tiene importantes implicaciones respecto de un viejo problema relacionado con los quasares. Las emisiones de los quasares en la región ultravioleta del espectro tienen un desplazamiento hacia la región visible. La gran mayoría de investigadores interesados en los quasares ha sostenido la idea de que sus desplazamientos hacia el rojo indican que están a miles de millones de años-luz dentro de un universo en expansión. Algunos investigadores han sugerido que los quasares son objetos cercanos en los que se producen fenómenos peculiares.

Un examen más profundo de espectros de quasar muestra que en muchos casos las líneas de absorción pueden ordenarse en grupos que tienen un desplazamiento hacia el rojo mucho más pequeño que el desplazamiento hacia el rojo del quasar. En 1969, John N. Bahcall, del Instituto de Estudios Avanzados, y Spitzer sugirieron que algunos de estos sistemas de líneas de absorción pueden ser producidos por las coronas de las galaxias a lo largo de la línea de visión del quasar. Con los resultados del IUE es posible comparar la absorción debida a la corona de nuestra galaxia con sistemas de líneas de absorción típicas de los quasares. Las pautas de absorción son notablemente similares y, por consiguiente, los datos del IUE corroboran la idea de que muchos sistemas de líneas de absorción de quasares se deben a las coronas interpuestas.

Si las coronas son realmente la causa de la absorción observada, hay que concluir que los quasares están situados a enormes distancias y que representan los objetos más luminosos que se conocen. Y si los sistemas de líneas de absorción comúnmente observados en el espectro de los quasares se deben a la absorción por las coronas de las galaxias, entonces las coronas deben ser mucho mayores que las imágenes fotográficas de las galaxias.

Las coronas que se necesitan para ajustar los efectos observados deberían tener de 100.000 a 300.000 años-luz de radio, es decir, el triple de las dimensiones de las galaxias en las fotografías. Por otra parte, es un hecho ya establecido que las galaxias son mucho mayores cuando se observan en la línea de emisión de 21 centímetros del hidrógeno neutro que cuando son observadas en longitudes de onda correspondientes al espectro visible. Y es indudable que aparecerían aún más grandes si se observasen usando las líneas de absorción altamente sensibles en la región ultravioleta. Pronto será posible generalizar estos estudios preliminares sobre coronas galácticas. Con la puesta en órbita del telescopio espacial de 2,4 metros en 1985 se obtendrá mucha información adicional acerca de la corona de nuestra galaxia, y de otras, usando la parte ultravioleta del espectro.

Ciencia y sociedad

Retroflujo de genes: del ARN al ADN

La complejidad y plasticidad del aparato genético de los organismos superiores no cesa de corroborarse. Hace cinco años sorprendió el descubrimiento de los genes fragmentados. Mientras en las bacterias las cadenas proteínicas están codificadas por series continuas de subunidades de ADN, los denominados nucleótidos, en la mayoría de los genes de anfibios, aves y mamíferos las secuencias codificadoras están interrumpidas por secuencias intercaladas no codificadoras, los intrones. Para expresar un gen fragmentado, la maquinaria enzimática de la célula transcribe primero el ADN (intrones incluidos) en ARN. A continuación se procesa ese primer producto de la transcripción. Al segmento inicial del gen se le añade un "encabezamiento". Al segmento final, una "cola": un largo rosario de un único tipo de nucleótido, adenilato (de ahí la denominación de poli-*A*). Por último, se entresacan enzimáticamente los intrones y se reúnen las secuencias codificadoras, de lo que resulta un ARN mensajero coherente que se traducirá a proteína.

No acabó ahí la sorpresa. Análisis posteriores del genoma (la dotación genética total) de células de mamífero revelaron que puede haber más de una copia de un gen; se da a veces hasta una familia entera de copias. En la mayoría de casos los intrones de las copias son distintos, pero las secuencias codificadoras se asemejan mucho, de forma que cualquiera de ellas puede transcribirse en un producto funcional. Sin embargo, algunos miembros de las familias génicas son pseudogenes, que, alterados por mutación, no rinden un producto funcional. En algunas familias génicas todos los miembros se agrupan en un solo cromosoma; en otras, los pseudogenes se han dispersado a un cromosoma que no porta los genes funcionales.

En 1980, Philip Leder y sus colegas estudiaban, en el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano de los Estados Unidos, la familia de genes de la alfa-globina de ratón, que codifica una de las proteínas de la hemoglobina. Al determinar la secuencia nucleotídica de un miembro de la familia hallaron, además de las típicas mutaciones aleatorias de los pseudogenes, algo que les llamó la atención. Faltaban los dos intrones del gen; las secuencias codificadoras se sucedían sin solución, como si se tratara de un ARN mensajero. Es más, el pseudogén sin intrones no se encontraba en el cromosoma de ratón número 15, como sus mellizos funcionales. Se había desplazado al número 11. La coincidencia de la escisión limpia de los intrones y el desplazamiento cromosómico sugería que el gen era una copia en ADN de ARN procesado, que, de alguna manera, se había reinsertado en el genoma del ratón. Se han descubierto desde entonces un buen número de genes con apariencia de ARN mensajero; Leder los llama genes procesados.

En recientes informes del laboratorio de Leder y del de Nicholas J. Cowan, de la Universidad de Princeton, se describen genes procesados que muestran más pruebas de haber atravesado por una fase de ARN. Gregory F. Hollis, Philip A. Hieter, O. Wesley McBride, David Swan y Leder informan en *Nature* de un miembro pseudogénico de la familia de genes humanos que codifican la cadena ligera lambda, un componente de las moléculas de anticuerpo. El pseudogén no se halla en el mismo cromosoma que las versiones funcionales conocidas del gen de la cadena ligera lambda, y carece de un intrón característico de todos los genes funcionales.

Hay aún otra huella significativa del procesamiento de ARN. Cerca del extremo terminal del gen se encuentra una larga secuencia de adenilatos, que aparenta ser el comienzo de una cola poli-*A* de ARN procesado. La serie de *A*es va seguida de una secuencia de nueve nucleótidos, idéntica a otra situada cerca del comienzo del gen procesado. Se da a menudo ese tipo de repetición de secuencias en los segmentos de ADN que se han abierto y en los que se ha introducido un nuevo fragmento de ADN. Se sigue de todo ello que un ARN maduro, derivado de un gen lambda, se copió de alguna forma en un filamento monocatenario de ADN que, convertido en un segmento de doble cadena, se insertó en el cromosoma. Si, en efecto, el pseudogén lambda procede de un ARN, se trata entonces de una transcripción muy grosera: se ha perdido la totalidad del extremo inicial del gen.

En otra colaboración en *Nature*, C. Deborah Wilde, Carol E. Crowther, T. P. Cripe, Mary Gwo-Shu Lee y Cowan describen un gen procesado que codifica la proteína beta-tubulina, un componente de los orgánulos celulares denominados microtúbulos. También aquí faltan los intrones, hay una cola poli-*A* y se dan segmentos repetidos que sugieren la existencia de inserción. En este caso, además, toda la secuencia es más o menos homóloga a la de un ARN mensajero funcional de la beta-tubulina. En otras palabras, el pseudogén de la beta-tubulina parece derivar de la transcripción completa de un ARN maduro.

El único enzima conocido que transcribe en ADN un molde de ARN es la transcriptasa inversa, enzima que poseen ciertos virus (los retrovirus) cuyo genoma está formado por ARN. Se ha sugerido que quizá los retrovirus hayan mediado en la transcripción inversa y la reintegración de algunos genes procesados, y, desde luego, hay señales de secuencias víricas en algunos de ellos. Puede también que algunos enzimas de mamífero transcriban ARN en ADN bajo circunstancias especiales. El flujo inverso de información genética debe ser escaso, pero, a lo largo de la evolución, hasta el proceso más infrecuente basta para explicar la presencia en un gran número de genes procesados.

El pion excitado

La proliferación de partículas elementales "exóticas" ha hecho del pion, o mesón pi, algo más bien prosaico. Se predijo su existencia en 1935 y se observó por vez primera en 1947; hoy se obtienen en los aceleradores de partículas cientos de miles de millones de piones. Lo que no obsta para que, en determinados aspectos, cueste más entender el pion que esas partículas exóticas. Hasta hace poco carecíamos de pruebas que demostraran la existencia de estados excitados en el pion.

Para la teoría vigente, el pion, como los demas mesones, es un sistema compuesto formado por un quark y un antiquark. El pion es el más ligero de esos sistemas, y su masa (en unidades de energía), de 140 megaelectronvolt, o MeV, corresponde a una séptima parte de la masa del protón. En la formación de los distintos mesones se combinan diversos "sabores", o tipos básicos, de quark y antiquark. Pero las propiedades de un mesón no dependen sólo del sabor de los quarks, sino también de su modo de movimiento. El propio pion constituye el estado de la materia en que los quarks y antiquarks más ligeros se unen en su modo de movimiento de menor energía. En este modo, los momentos angulares de espín intrínsecos del quark y el antiquark se anulan y no

hay momento angular orbital, de donde resulta que el mesón posee un momento angular total nulo.

En ciertos mesones compuestos por un quark y antiquark más pesados se ha observado un amplio espectro de estados excitados. El ejemplo más valioso lo constituye la partícula *J*, o psi, descubierta en 1974; a los pocos días se descubrió el primer estado excitado y se conoce ya una docena de mesones afines. Todos los estados tienen los mismos constituyentes en quarks, pero difieren en energía, momento y otras propiedades, puesto que, en cada estado, el quark y antiquark poseen un modo de movimiento distinto.

El pion debería poseer un espectro similar, pero resulta extremadamente difícil detectar los estados excitados. Quince investigadores, de los institutos italianos de física nuclear de Milán y Bolonia y del Instituto para la Investigación Nuclear de Dubna, exponen en *Physical Review Letters* las nuevas pruebas. Los investigadores utilizaron un haz de piones de alta energía generado en el acelerador de protones de Serpukhov, a unos 100 kilómetros al sur de Moscú. Examinaron 120.000 colisiones de un pion con un núcleo atómico, que producían tres piones.

En experimentos anteriores, otros autores habían sugerido la posibilidad de excitaciones del pion, pero los resultados eran inciertos y no mostraban la coherencia debida. Los recientes ensayos de Serpukhov muestran un amplio incremento en el número de sucesos de tres piones a una energía de 1240 MeV, prueba de la existencia de una partícula con esa masa. Se halló otro incremento a 1770 MeV. Ambos incrementos parecen señalar la presencia de un mesón en el que los momentos angulares de espín del quark y del antiquark se anulan y no existe momento orbital; en otras palabras, el momento angular de los dos nuevos mesones coincide con el del pion. Otras propiedades de los nuevos mesones se han probado idénticas a las del pion. "Pueden interpretarse estas observaciones como excitaciones radiales del mesón pi", sostiene el informe. En una excitación radial, las trayectorias del quark y del antiquark tienen la misma forma que la del pion, pero abarcan un volumen mayor.

La estirpe de Lucy

Siete fragmentos de cráneo hallados el año pasado en el valle del río Awash, Etiopía, prolongan la edad de *Australopithecus*, el homínido más primitivo que se conoce, hasta el Plioceno medio: cuatro largos millones de años. El descubrimiento se encuadra en un importante hallazgo de fósiles arrancados a esa desolada porción del triángulo Afar, a lo largo de una campaña de dos meses de duración que realizó un equipo internacional encabezado por J. Desmond Clark. Leonard Krishtalka fue quien desenterró los fragmentos craneanos.

Los fragmentos aparecieron unos 12 metros por debajo de un estrato volcánico marcador conocido por Toba de Cenizas. Robert Walter, de la Universidad de Toronto, ha determinado, por radiometría, la edad de algunos minerales de la toba. Las primeras estimaciones, basadas en la desintegración de un isótopo radiactivo del potasio y en el análisis de las huellas dejadas por la fisión de núcleos atómicos, dan a la toba una edad de 4,0 millones de años, más menos 10.000 años. Los fragmentos subyacían a la toba, por lo que cabe presumirles una antigüedad mayor.

Hasta estos últimos hallazgos, el homínido de más antigüedad que se conocía era "Lucy", un representante casi entero del género *Australopithecus*, descubierto a mediados de la década de 1970 por Donald C. Johanson, a la sazón en la Case Western Reserve. "Lucy" se encontró unos 70 kilómetros al norte del río Awash, y Johanson la incluyó en una nueva especie, *A. afarensis*. Al esqueleto fosilizado se le suponen unos 3,6 millones de edad.

Los fragmentos craneanos del río Awash corresponden al hueso frontal de un individuo que el paleontólogo del grupo, Tim D. White, de Berkeley, incluye en la misma especie que "Lucy". Se aprecia parte de la sutura que une los huesos parietal y frontal, lo que permitió a White determinar que el individuo era un adulto. El hueso frontal, en su forma, es extremadamente primitivo, y algo menor que el correspondiente a un chimpancé de tamaño medio.

Unos seis metros por debajo de la Toba de Cenizas, White halló la porción superior de un fémur de *Australopithecus*, que correspondía a un adulto totalmente adaptado a la marcha erguida. White estima que el individuo debía medir unos 137 centímetros. También se ha incluido este fósil en la especie *A. afarensis*. Puesto que el fémur es algo posterior a los fragmentos de cráneo, su presencia en la misma área sugiere que esa especie de homínido habitó el valle del Awash una larga temporada. Los dos hallazgos aportan nuevas pruebas de que la locomoción bípeda se adelantó a los cambios evolutivos que produjeron el aumento de tamaño del cráneo de los homínidos.

La alergia

La alergia podría definirse como un fallo del sistema inmunitario. No sabemos todavía por qué los que padecen fiebre del heno producen anticuerpos contra un polen inocuo, a pesar de conocerse los agentes mediadores de la respuesta

Paul D. Buisseret

Es recomendable iniciar el estudio de la alergia con la definición de la palabra, estableciendo el alcance de su significado. "Alergia" viene de los términos griegos "*allos*" (otro) y "*ergon*" (trabajo). La derivación del término implica una reacción inusitada o inapropiada ante un estímulo. Pero no todas las respuestas adversas a estímulos externos normalmente inocuos son alergias, ni la diferencia está siempre muy clara. Una persona puede experimentar una erupción con picores a raíz de una inyección de penicilina, otra, cuando lleva cierto reloj de pulsera. Los que padecen de la fiebre del heno estornudan en ciertas temporadas. Algunas mujeres sufren náuseas por ingerir anticonceptivos por vía oral. Hay quien experimenta dolores abdominales y diarrea por comer ciertos alimentos. ¿Son "alérgicas" todas esas personas? Algunas sí, por supuesto, pero otras puede que no. Por ejemplo, son muchos los que muestran una reacción inusitada o exagerada ante un fármaco, pero no son necesariamente alérgicos a él.

La alergia es un trastorno del sistema inmunitario; es un fallo de la inmunidad. En el sistema inmunitario de un organismo vertebrado, se levanta una frontera entre lo propio y lo extraño. El organismo distingue entre los tejidos, células, proteínas y algunas otras macromoléculas extraños y los suyos; los identifica como inocuos o potencialmente perjudiciales, decidiendo en consecuencia si debe ignorarlos o debe defender el organismo contra ellos. Las células con capacidad para reconocer, evaluar y neutralizar o eliminar la materia extraña integran el sistema inmunitario. El primer paso es el reconocimiento de un antígeno específico, tarea realizada por los glóbulos blancos de la sangre, los linfocitos. Abundan no sólo en la sangre, sino también en el sistema linfático, los pulmones, el hígado y el bazo. Hay dos clases de linfocitos: células *T* y células *B*. Cada clon (así se denominan las líneas genéticamente idénticas) de células *T* y *B* está preprogramado para reconocer una combinación y conformación altamente específica de átomos, denominada epítopo, en una molécula extraña al organismo. Las células efectúan el reconocimiento exponiendo en su superficie receptores específicos, conformados para unirse a un determinado epítopo. Una sustancia que lleve suficientes epítopos reconocibles para provocar una respuesta inmunitaria se denomina antígeno.

El tipo de respuesta inmunitaria depende de la naturaleza del antígeno. Algunos antígenos estimulan principalmente una respuesta de tipo celular; éstos se "presentan" ante las células *T* por medio de grandes células especializadas llamadas macrófagos. Los antígenos se ligan a receptores de las células *T*, determinando que las células secreten unas sustancias complejas, las linfocinas. En el lugar de un encuentro antigénico, ciertas linfocinas provocan la dilatación de pequeños vasos sanguíneos locales, lo que induce un mayor acarreo de sangre, enrojeciendo y calentando así el tejido. Otras linfocinas, al aumentar la permeabilidad de los vasos, permiten a los fluidos y células sanguíneas invadir los tejidos de su alrededor, causando hinchazón. La tríada clásica de la reacción inflamatoria es enrojecimiento, calor e hinchazón. Hay todavía otras linfocinas, que activan a los macrófagos para que se congreguen en el lugar de la inflamación. Función propia de los macrófagos es fagocitar: rodean al antígeno, neutralizándolo o destruyéndolo enzimáticamente.

En circunstancias normales, las células *T* están capacitadas para evaluar la amenaza de un antígeno: distinguir entre sustancias extrañas nocivas (como las bacterias patógenas) y cuerpos no nocivos. Si falla el sistema de reconocimiento, la sustancia inocua puede confundirse con una sustancia dañina, actuando de antígeno y provocando la respuesta celular descrita anteriormente. Eso es lo que ocurre cuando una persona manifiesta una dermatitis de contacto –un sarpullido u otra inflamación de la piel– después de haber tocado o llevado una sustancia normalmente inocua, como puede ser un cosmético, un collar o la hoja de una planta. Puesto que este tipo de reacción alérgica tarda unas 48 horas en manifestarse, se suele denominar hipersensibilidad retardada.

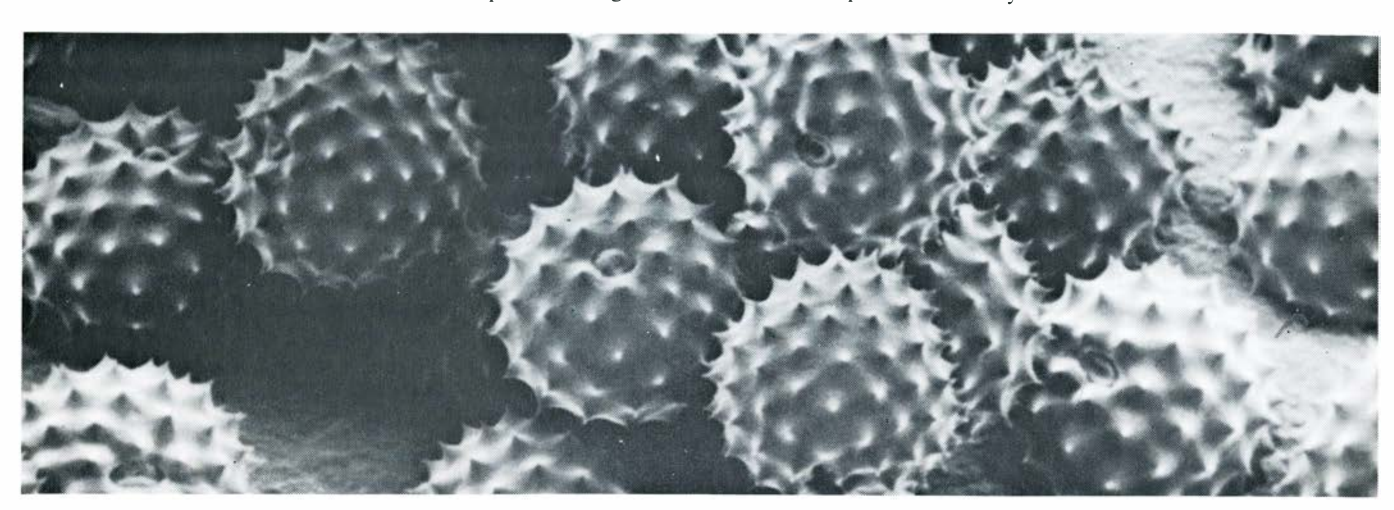
Hipersensibilidad inmediata

Hay otra clase de reacción alérgica que se manifiesta más explosivamente, a los pocos segundos o minutos de un encuentro con un antígeno. Se llama hipersensibilidad inmediata o respuesta anafiláctica; no viene mediada por células *T* y macrófagos, sino por anticuerpos producidos por linfocitos *B*. El receptor que aparece en la superficie de una célula *B*, inmadura y quiescente, es una muestra del anticuerpo específico para cuya síntesis está preparada. Cuando un antígeno se liga a tal receptor, se produce una transformación de la célula *B*. La célula se multiplica y se diferencia, formando un clon de células plasmáticas en el que aumenta mucho su tamaño la estructura que sintetiza proteínas, el retículo endoplasmático. Las células plasmáticas sintetizan y secretan a la sangre millones de moléculas de anticuerpos, idénticas entre sí, generando una respuesta inmunológica humoral (distinta de la respuesta inmunológica celular).

Aquí también es crucial el reconocimiento correcto de la amenaza por el antígeno. En cada bocanada de aire o toma de alimento, el individuo ingiere millones de moléculas extrañas a su organismo, potencialmente antigénicas; la transformación descontrolada de células *B* en células plasmáticas, en respuesta a ese ataque, podría mantener el cuerpo en un estado permanente de excitación inmunológica, produciendo anticuerpos en contra de muchas molé-

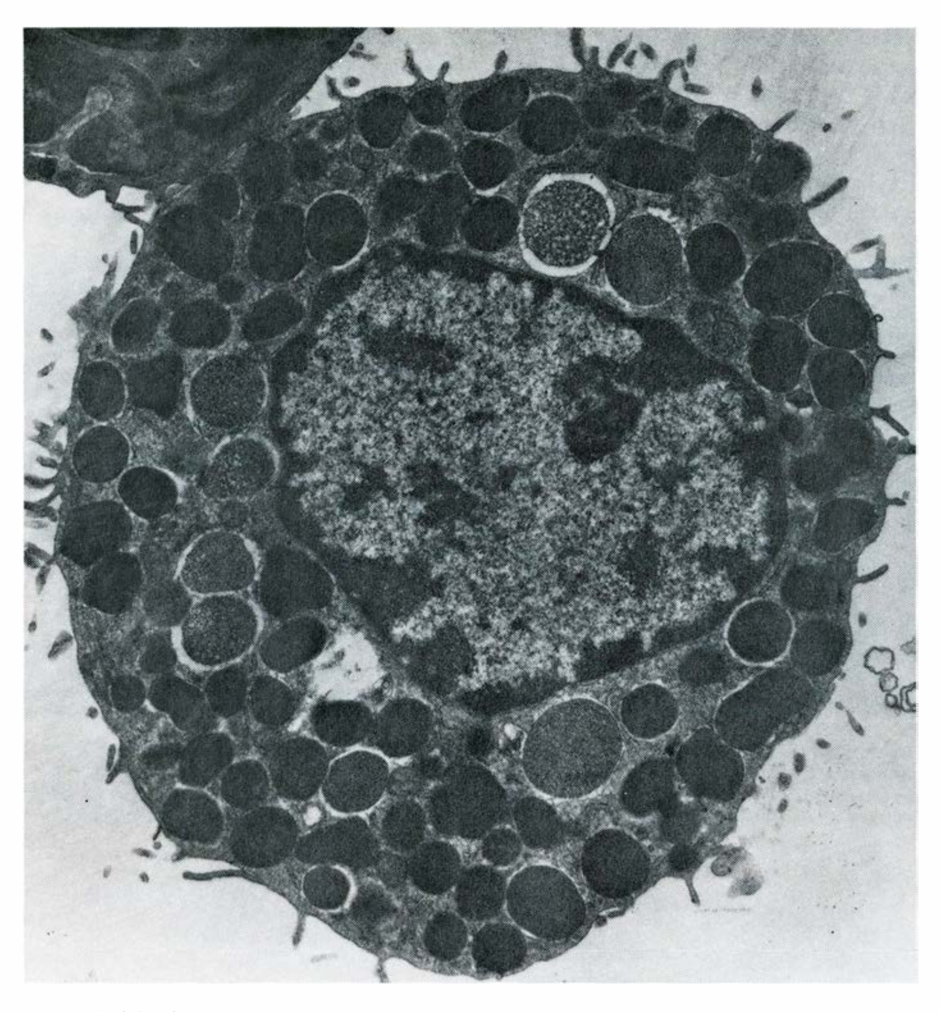
culas inocuas o inclusive beneficiosas. La razón de que eso no ocurra por norma débese a que la transformación de las células *B* está controlada por subclases de linfocitos *T*. Ciertas células *T* "coadyuvantes" ("*helpers*") inducen la transformación de las células *B*, activadas por antígenos, cuando se requiere la síntesis de anticuerpos, y otras células *T* "supresoras" inhiben la producción inoportuna de anticuerpos. Parece probable que el fallo de este sistema regulador sea lo que conduce a una respuesta alérgica. O las células supresoras no actúan como es debido, o su mensaje químico no se transmite bien; entonces, algunos linfocitos *B* que se han unido a un antígeno inocuo se estimulan, convirtiéndose en células plasmáticas que secretan anticuerpos.

Hay cinco clases de moléculas de an-

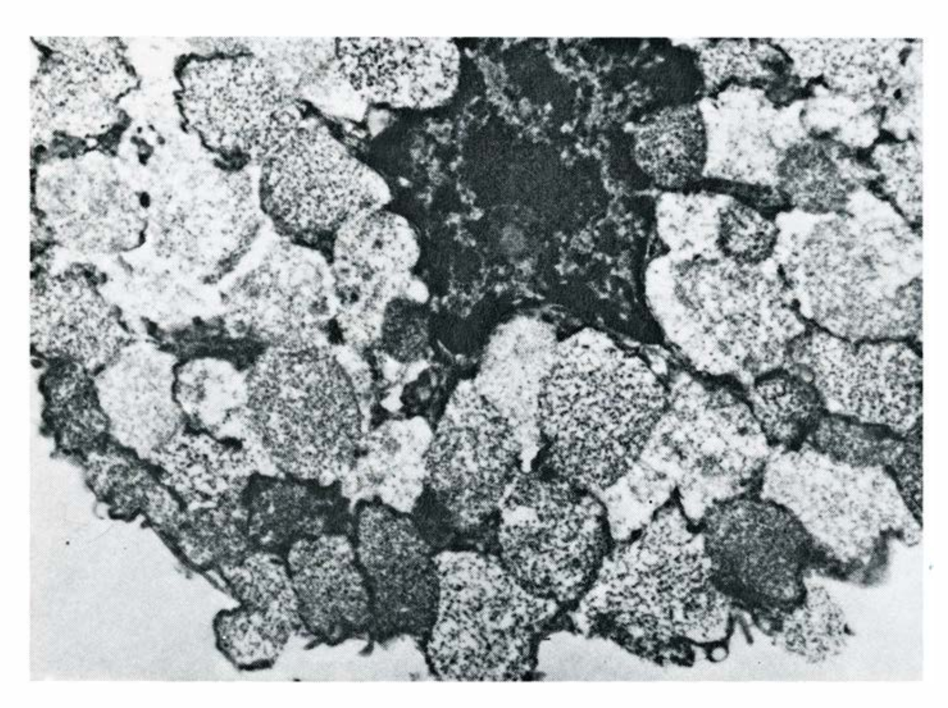


SOBRESALE EL POLEN DE LA PLANTA AMBROSIA entre los alérgenos famosos. Se trata de una sustancia de suyo inocua, ante la que muchos individuos sensibles a ella manifiestan, sin embargo, una respuesta inmunológica indebida. En el caso del polen de la ambrosía y la mayoría de los demás alérgenos transportados por el aire, se produce una respuesta de tipo "hipersensibilidad inmediata", mediada por un anticuerpo de la clase IgE y por unas células de tejido conjuntivo llamadas mastocitos. Los granos de polen están ampliados 1850 veces en esta microfotografía de David J. Lim.

ACARO DOMESTICO, responsable de muchos casos de rinitis y asma alérgica de tipo perenne. Vive en el polvo de las casas, el que cubre colchones y almohadas, donde las escamas de piel humana que le sirven de alimento caen en abundancia. El de la microfotografía es un *Dermatophagoides farinae*, ampliado 500 veces. La fotografía se tomó con el microscopio electrónico de barrido del laboratorio de acarología de la Universidad estatal de Ohio.



EL MASTOCITO constituye la fuente de histamina y de otros mediadores químicos en la respuesta de tipo de hipersensibilidad inmediata. En esta electromicrografía, tomada por Ernesto O. Hoffmann, de la Facultad de Medicina de la Universidad estatal de Louisiana en Nueva Orleans, se ofrece una sección fina de mastocito de rata, ampliada unas 7000 veces. La célula encierra unos 1000 gránulos densos, que contienen mediadores. La persona alérgica produce anticuerpos contra el alérgeno en cuestión; los anticuerpos se ligan a los receptores situados en la superficie de los mastocitos. Cuando torna a presentarse el alérgeno, se liga a los anticuerpos, provocando la liberación de los mediadores y la reacción alérgica.



MASTOCITO EN PROCESO DE DESGRANULACION, en esta micrografía tomada también por Hoffmann. Algunos gránulos se han fundido con la membrana celular y han descargado su contenido. Otros parecen haberse fundido con los gránulos adyacentes y haber vertido su contenido en la membrana.

ticuerpo: las inmunoglobulinas IgM, IgD, IgG (de la que existen varias subclases), IgE e IgA. Cada inmunoglobulina desempeña un papel particular en la defensa del organismo contra la infección o en otra tarea inmunitaria. En la mayoría de las personas, a la IgE parece corresponderle una misión inmunológica limitada: contribuye a repeler la invasión por lombrices parasitarias. De ahí que en la sangre de personas que habitan en regiones tropicales, donde la infestación por lombrices es frecuente, se registren niveles elevados de IgE. En los demás lugares del mundo no se le ha encontrado mayor función adaptativa, o "beneficiosa", a esa inmunoglobulina, de la que el hombre suele sintetizar muy poca. Los IgE suponen tan sólo alrededor del 0,001 por ciento de todos los anticuerpos que se encuentran en la sangre de una persona normal.

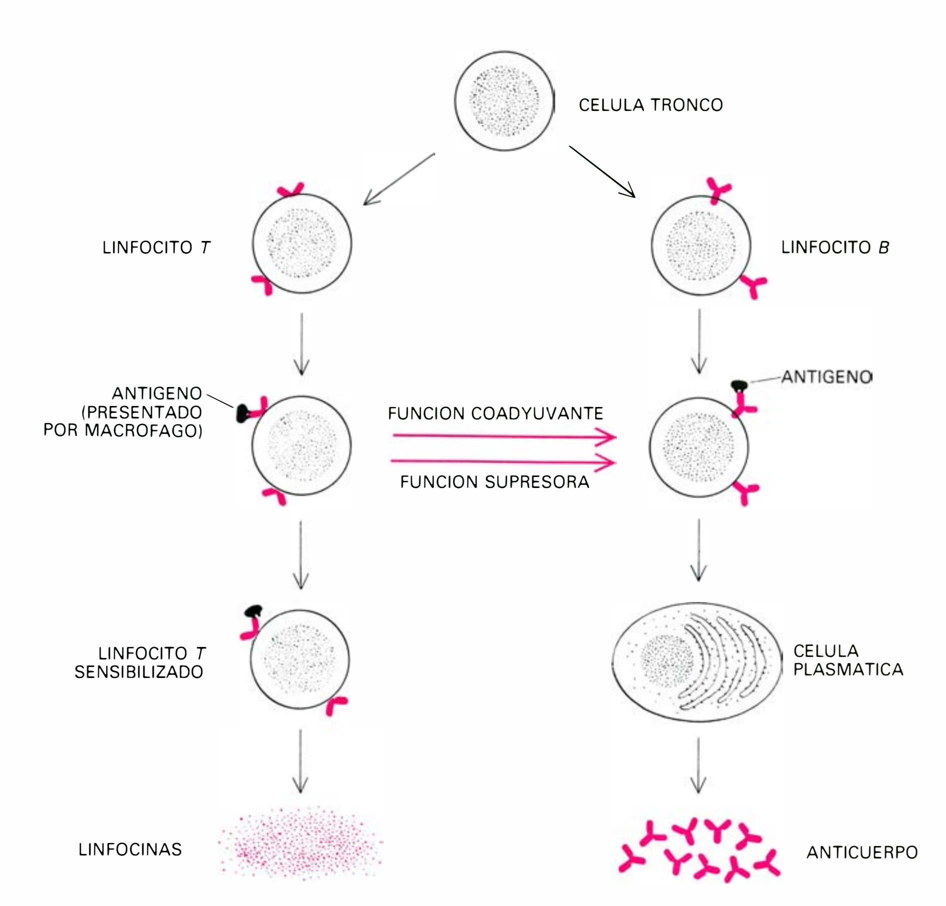
La situación cambia en el individuo alérgico: la IgE media aquí la hipersensibilidad inmediata. En ausencia de una modulación correcta por medio de las células *T*, la unión de un antígeno (alérgeno) que normalmente no provoca una respuesta inmunológica transforma un clon de linfocitos *B* en la persona potencialmente alérgica. Las células plasmáticas producen anticuerpos en contra del alérgeno, preferentemente anticuerpos de la clase IgE, por causas aún desconocidas. Las alergias deben su carácter específico a la especificidad de la propia IgE. Una persona es alérgica a los gatos porque produce IgE en respuesta a la unión de una proteína específica del pelo o la piel de gato; posiblemente tolere a los demás animales sin mayor complicación. El alérgico a las ostras produce una IgE que reconoce e interactúa con una proteína de las ostras, ingeriendo cualquier otro alimento sin peligro. Algunos desafortunados, sin embargo, tienen tal tendencia a manifestar alergias que producen IgE frente a más de un alérgeno.

La reacción alérgica

La IgE no media la reacción alérgica en solitario; a ella le toca preparar una célula efectora. En 1877, el bacteriólogo alemán Paul Ehrlich describió una curiosa célula de tejido conjuntivo que abundaba sobre todo en la piel, órganos linfoides, mucosas del ojo, nariz y boca, y en los sistemas respiratorio e intestinal. Ehrlich observó que las células parecían estar rellenas de grandes gránulos que adquirían una tonalidad brillante al tratarlas con ciertos colorantes. Se presumió que los gránulos habían sido ingeridos por las células, de

ahí que se las llamase "mastocitos" (de la palabra alemana *mast*, un pienso que engorda). El nombre quedó, a pesar de que, probablemente, los gránulos no se ingieren: se producen en el interior celular. Hay unos 1000 en cada mastocito; son vesículas llenas de mediadores químicos de la reacción alérgica.

La superficie del mastocito está poblada de 100.000 a 500.000 receptores para moléculas de IgE. Cuando se sintetizan, en cantidades millonarias, moléculas de anticuerpos IgE específicos, en respuesta a la unión de un alérgeno, éstos recorren el sistema sanguíneo hacia los mastocitos del tejido conjuntivo y se fijan firmemente a los receptores. Sin embargo, no se produce aún reacción alérgica. Esta sólo ocurre cuando el individuo alérgico vuelve a encontrarse con el mismo antígeno. Esta vez, el antígeno no necesita seguir todo el proceso de activación de las células *B* para que se transformen. Va derecho a las IgE fijadas en los mastocitos y se liga al anticuerpo. Lo que provoca la desgranulación del mastocito: los gránulos salen a la superficie de la célula y sueltan su contenido a los tejidos circundantes.



DOS CLASES DE LINFOCITOS median la respuesta inmunológica. Ambos descienden de células que se originan en la médula ósea. Los linfocitos *T* se encargan de la respuesta de tipo celular, incluidas las reacciones alérgicas del tipo de hipersensibilidad retardada; los linfocitos *B* fabrican los anticuerpos responsables de la respuesta de tipo humoral, incluidas las reacciones alérgicas del tipo de hipersensibilidad inmediata. Una y otra clase de linfocitos poseen en su superficie receptores capacitados para reconocer el epítopo específico, o determinante antigénico, presente en las moléculas extrañas. Algunas células *T*, sensibilizadas por el contacto con un antígeno, liberan linfocinas, que inducen diversas reacciones inflamatorias. Los receptores de una célula *B* constituyen ejemplos de las moléculas de anticuerpo que la célula puede sintetizar. El contacto con un antígeno específico activa la transformación de un linfocito *B* en una célula plasmática que secreta anticuerpos. La transformación se regula a través de subclases de linfocitos *T* que funcionan como "coadyuvantes" o como "supresoras". Ilustración de Bunji Tagawa.

La secuencia de sucesos que culmina con la desgranulación ha sido desentrañada en gran parte por Michael A. Kaliner, Robert P. Orange, K. Frank Austen y Teruko Ishizaka. Dos moléculas adyacentes de IgE en la superficie de un mastocito se unen por medio de un puente formado por dos epítopos de una molécula de antígeno. Este puente activa una molécula que es precursor de un enzima (serina esterasa) que digiere proteínas; cuando el precursor, la serina proesterasa, se activa, se convierte en el enzima. La serina esterasa inicia una cadena de reacciones que culmina en la generación de fosfatidil colina.

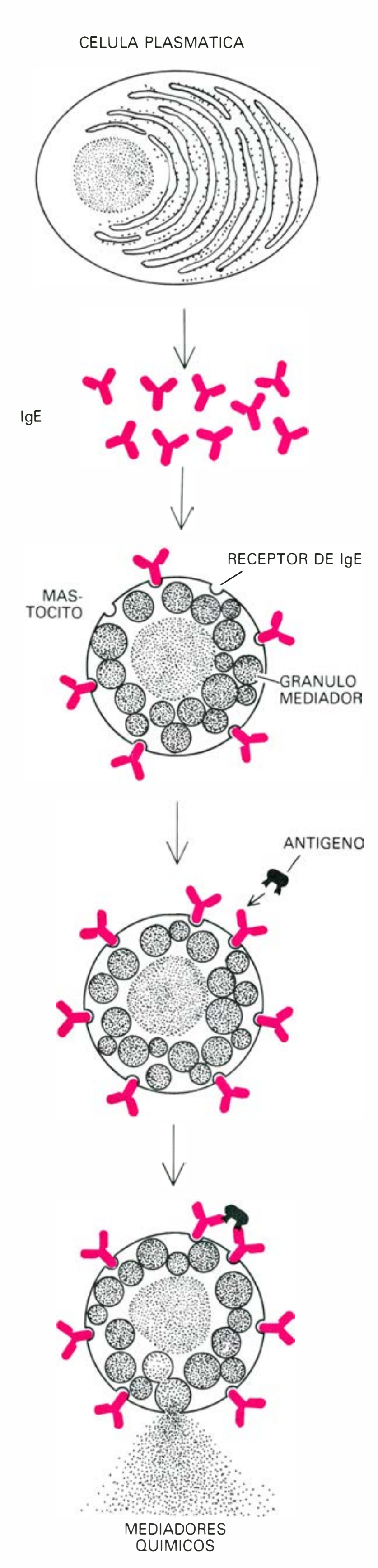
La secuencia de sucesos modifica hasta cierto punto la estructura de la membrana exterior del mastocito. La membrana se hace permeable a los iones calcio; el calcio entra en la célula y activa el enzima fosfolipasa A_2, que promociona el siguiente paso en el metabolismo de la fosfatidil colina, la producción de lisofosfatidil colina y ácido araquidónico. La entrada de iones calcio también activa enzimas que liberan energía y facilita el tendido de microtúbulos y la contracción de microfilamentos. Estas estructuras contráctiles hacen que los gránulos se sitúen en la membrana celular, se fundan con ella y viertan su contenido: histamina, heparina, serotonina y factores químicos que activan las plaquetas sanguíneas y atraen los glóbulos blancos llamados eosinófilos y células fagocíticas. Cada uno de estos mediadores contribuye, a su manera, a la reacción alérgica.

Prostaglandinas y leucotrienos

Además de los mediadores preformados, almacenados en los gránulos de los mastocitos, hay dos grupos importantes de potentes mediadores biológicos; se sintetizan en los mastocitos y en varios tipos de leucocitos (glóbulos blancos). Se trata de las prostaglandinas y los leucotrienos. Las prostaglandinas son una familia de ácidos grasos cuya importancia como mensajeros celulares y como agentes que afectan a diversas actividades fisiológicas se conoce hace ya tiempo.

Aunque la caracterización química de los leucotrienos sea reciente, su participación en las reacciones alérgicas se observó hace décadas. A finales de los años 30 se descubrió una sustancia en el fluido extracelular del pulmón, claramente distinguible de los mediadores liberados de los gránulos de los mastocitos, que causaba una lenta y profunda constricción de larga duración en las vías respiratorias de los animales de experimentación. Se la denominó sustancia de reacción lenta anafiláctica, o *SRS-A*. En los últimos tres años se ha demostrado que la *SRS-A* es una mezcla de tres sustancias con estructura química inusitada. Son tioésteres: ácidos grasos ligados por un átomo de azufre a uno o varios aminoácidos. Bengt Samuelsson, que describió su estructura, los llamó leucotrienos, porque se fabrican por los leucocitos y tienen tres enlaces dobles conjugados.

Las prostaglandinas y los leucotrienos comparten un mismo origen. Derivan, por dos vías enzimáticas diferentes, del ácido araquidónico que se produce en células que han sufrido la rotura de su membrana. El enzima fosfolipasa degrada las moléculas de fosfolípidos (como la fosfatidil colina) de la membrana celular rota, para formar ácido araquidónico, produciéndose una "cascada de ácido araquidónico" de dos rutas. La ruta de prostaglandinas se ini-



MISION que cumple el mastocito en la hipersensibilidad, en esquema. La célula plasmática segrega IgE en respuesta a la primera aparición de un antígeno. La inmunoglobulina se fija a los receptores que hay en la superficie de los mastocitos. Cuando el antígeno torna de nuevo, los epítopos de la molécula antigénica se ligan con dos moléculas de IgE adyacentes. La formación de este puente entre las moléculas IgE desencadena un proceso a lo largo del cual se desgranulará el mastocito y se liberarán los mediadores químicos de la reacción alérgica.

cia cuando el enzima ciclooxigenasa convierte el ácido araquidónico en dos endoperóxidos cíclicos, las prostaglandinas G_2, H_2, que, por medio de enzimas denominados sintetasas, producen las prostaglandinas biológicamente activas D_2, E_2, $F_{2\alpha}$, I_2 y tromboxano A_2. Las prostaglandinas $F_{2\alpha}$ y tromboxano A_2 son constrictores potentes, de vida corta, del músculo liso de los bronquios pulmonares. La prostaglandina E_2 produce el efecto opuesto: dilata los bronquios. Los miembros de la familia de las prostaglandinas también alteran la actividad de las glándulas mucosas y la viscosidad de sus secreciones, la adherencia de las plaquetas sanguíneas y la propiedad no adherente de la pared interna de los vasos sanguíneos.

Otro enzima, la lipoxigenasa, inicia la ruta de los leucotrienos, convirtiendo ácido araquidónico en ácido 5-hidroperoxi-eicosatetraenoico, que se modifica para formar leucotrieno A_4. (La cifra subíndice designa la existencia en total de cuatro enlaces dobles en cada molécula de leucotrieno.) El leucotrieno A_4 se convierte en leucotrieno B_4, si añadimos agua, o en leucotrieno C_4 si añadimos glutatión. La pérdida de ácido glutámico transforma el leucotrieno C_4 en leucotrieno D_4; la pérdida de glicina de D_4 forma el leucotrieno E_4. La mezcla de C_4, D_4 y E_4 constituye el *SRS-A*. Los leucotrienos son de 100 a 1000 veces más potentes que la histamina o las prostaglandinas en la constricción de las vías respiratorias bronquiales.

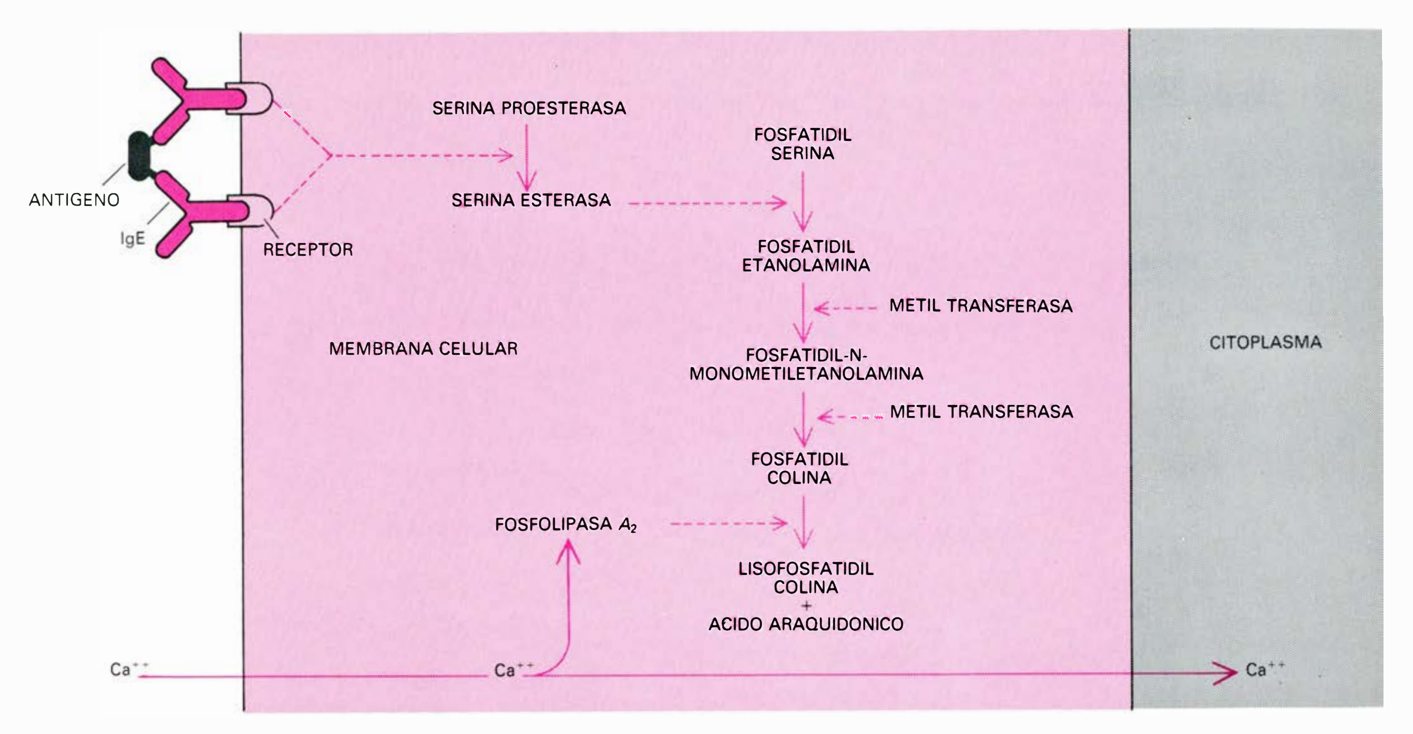
Se desconoce aún el eslabón que media entre la activación de una reacción alérgica y el inicio de la cascada de ácido araquidónico en leucotrienos. Otros estímulos, aparte de la respuesta alérgica mediada por la IgE, pueden también iniciar la cascada; verbigracia: señales hormonales, traumas e infección. Sin duda las prostaglandinas y los leucotrienos son factores importantes en muchos estados de tipo no alérgico. En las reacciones alérgicas se unen a los mediadores liberados por los gránulos de los mastocitos, para provocar: la contracción del músculo liso en vías respiratorias e intestino, la dilatación de pequeños vasos sanguíneos y aumento de su permeabilidad con respecto al agua y a las proteínas plasmáticas, la secreción de un moco espeso y pegajoso y, por último, la estimulación de terminaciones nerviosas en la piel, que explican picores y dolores.

Alérgenos

La ancha gama de pacientes alérgicos presentan reacciones ante un espectro muy vaciado de sustancias sin ninguna relación aparente entre sí. Pero hay un elenco de alérgenos comunes que suelen repetirse de una manera pertinaz. La razón se desconoce. ¿Por qué el polen de una planta, la ambrosía, produce fiebre del heno en millones de individuos sensibles cuando la inhalan, mientras que el polen de otra planta, la ortiga por ejemplo, apenas si molesta a nadie? Los dos pólenes abundan en el aire durante determinadas épocas del año y los dos se inhalan fácilmente. A lo largo de un período de dos años, cerca de 3000 pacientes ingresados en el servicio de alergia del Hospital Saint Mary de Londres se mostraron alérgicos al polen de hierbas comunes; ni uno solo lo era al polen de la ortiga o del plátano. Evidentemente, la alergenicidad depende, en parte, de propiedades físicoquímicas del polen mismo desconocidas. Lo mismo ocurre con las esporas de mohos y hongos, al parecer. Las hay que producen la fiebre del heno, mientras que otras, muy similares, no constituyen una fuente tan indiscutible.

La alergenicidad de las drogas ofrece asimismo un amplio rango de variación. La mayoría de las drogas son bastante inertes y no se combinan fácilmente con las proteínas del organismo. Ese grupo tampoco suele ser alergénico. Otras drogas más reactivas (y los productos de su degradación en el organismo) pueden o no provocar una respuesta alérgica. Ello se explica porque las drogas suelen ser moléculas pequeñas (demasiado pequeñas para actuar como antígenos, aunque sean epítopos). Cuando tales "haptenos" se combinan con una proteína del organismo, el complejo resultante puede ser antigénico o, en el caso de la persona alérgica, alergénico. Aun así, puede que queden suficientes moléculas de haptenos sin formar complejos para ocupar la mayoría de los lugares de unión de los antígenos en las IgE, bloqueando la unión de los complejos droga-proteína y evitando el desarrollo de una respuesta alérgica. Este fenómeno de inhibición causada por el hapteno puede constituir una de las razones por las que las reacciones alérgicas a las drogas son relativamente poco frecuentes. Más corrientes son los efectos negativos no alérgicos de las drogas.

Aunque la fiebre del heno estacional provocada por pólenes o esporas es la manifestación más común de las alergias mediadas por las IgE, una proporción importante de individuos alérgicos presentan síntomas similares a lo largo de todo el año. Así ciertas personas que sufren rinitis alérgica (que puede progresar hasta convertirse en asma) son alérgicas a algún animal doméstico. Si



COMIENZA LA ACTIVACION DE UN MASTOCITO cuando dos moléculas de IgE que hay en su superficie se unen mediante el puente que establece la molécula antigénica. Llegados aquí, se activa la serina proesterasa para formar serina esterasa, un enzima que convierte la fosfatidil serina en fosfatidil etanolamina. Esta última se metila en dos etapas hasta constituir fosfatidil colina. En virtud de los cambios ocurridos en la membrana celular, se registra un flujo marcado de iones calcio (Ca^{++}) hacia el interior celular. El calcio activa el enzima fosfolipasa A_2, que promueve la degradación de la fosfatidil colina, formando lisofosfatidil colina y ácido araquidónico. Otros iones de calcio entran asimismo en la célula, donde instan la desgranulación.

MEMBRANA CELULAR
GRANULO MEDIADOR
CITOPLASMA
ANTIGENO
IgE
RECEPTOR
Ca^{++}
MONTAJE DE MICROTUBULOS
CONTRACCION DE MICROFILAMENTOS
MOVIMIENTO DE GRANULOS
FUSION DE GRANULOS CON LA MEMBRANA CELULAR
INHIBIDO POR CROMOGLICATO SODICO
INHIBIDO POR HORMONAS DE TIPO CORTICOSTEROIDE Y NIVEL DE AMP CICLICO AUMENTADO
INHIBIDO POR ANTIHISTAMINAS, ASPIRINA Y OTRAS DROGAS
MEDIADORES QUIMICOS
CELULA DE MUSCULO LISO
PEQUEÑO VASO SANGUINEO
GLANDULA MUCOSA
PLAQUETAS SANGUINEAS
TERMINACIONES NERVIOSAS DE LA PIEL
EOSINOFILOS

NATURALEZA Y CONSECUENCIAS de la desgranulación. Los iones de calcio que entran en el citoplasma regulan los enzimas que controlan los microfilamentos, cuya actividad permite que los gránulos avancen hacia la membrana celular, se fundan con ésta y descarguen su contenido: mediadores químicos de la reacción alérgica. Los mediadores tienen por objeto diana a tejidos y células. Así, contraen las células del músculo liso, dilatan los pequeños vasos sanguíneos, aumentando su permeabilidad, estimulan la secreción de las glándulas mucosas, activan las plaquetas sanguíneas, irritan las terminaciones nerviosas de la piel y atraen una clase de glóbulos blancos denominados eosinófilos. El proceso es sensible a la acción de drogas en distintas etapas de su desarrollo. El cromoglicato sódico bloquea la entrada de iones de calcio; mediante hormonas de tipo corticosteroide y agentes que aumenten la concentración citoplásmica de adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico) se impide el movimiento de los gránulos; una vez liberados, los mediadores pueden ser neutralizados por varias drogas, las antihistaminas y aspirina por ejemplo, o pueden ver contrarrestada su actividad por drogas del tipo de la adrenalina.

FOSFOLIPIDO
MEMBRANA CELULAR

MEMBRANA
ROTA

FOSFOLIPASA

ACIDO ARAQUIDONICO

CICLOOXIGENASA

LIPOOXIGENASA

PROSTAGLANDINA G_2

ACIDO 5-HIDROPEROXI-
EICOSATETRAENOICO

PROSTAGLANDINA H_2

LEUCOTRIENO A_4

H_2O

GLUTATION

LEUCOTRIENO B_4

ACIDO GLUTAMICO

GLICINA

CISTEINA

LEUCOTRIENO C_4

PROSTAGLANDINA E_2

PROSTAGLANDINA D_2

PROSTAGLANDINA $F_{2\alpha}$

TROMBOXANO A_2

GLICINA

CISTEINA

LEUCOTRIENO D_4

PROSTAGLANDINA I_2
(PROSTACICLINA)

CISTEINA

LEUCOTRIENO E_4

no hay ningún animal, se busca entre otros componentes del ambiente del hogar. Frecuentemente, la culpa la tiene el diminuto ácaro del polvo, el *Dermatophagoides*, que vive entre el polvo doméstico y se alimenta (como su nombre indica) de las escamas de la piel humana. Todo el mundo pierde grandes cantidades de células muertas de la piel a diario, especialmente en el dormitorio, al cambiarse de ropa. De ahí que el ácaro se encuentre, preferentemente, en el polvo de colchones, tapicerías y almohadas. Las personas que lo sufren, suelen creerse alérgicas a las plumas cuando duermen con almohada de éstas, y no a la microfauna que habita entre las mismas.

En la mayoría de los casos, con una prueba muy sencilla en la piel se resuelve la duda sobre qué alérgeno del aire produce la fiebre del heno o asma. Se inyecta una sola gota de extracto del alérgeno sospechoso por vía subcutánea en la piel del brazo. Si el paciente ha sintetizado IgE contra el alérgeno, los mastocitos de la piel se activan, produciéndose su desgranulación. A los 10 minutos se manifiesta una reacción alérgica aguda y local en forma de roncha con prurito, rodeada por un halo de piel enrojecida.

Alergia a los alimentos

Las alergias a las partículas transportadas por el aire son bastante corrientes y afectan a más del 10 por ciento de la población. De la alergia a los alimentos, menos frecuente, desconocemos su verdadera incidencia; a menudo los síntomas inducidos por los alimentos son menos definidos que los de la fiebre del heno o el asma inducidos por alérgenos transportados por el aire. El rápido desarrollo de urticaria tras la ingestión de un determinado alimento remite a una respuesta alérgica probable; pero muchos síntomas son menos obvios y pueden imitar la sintomatología de otros trastornos no alérgicos. Dolores abdominales y diarrea, por ejemplo, son con mayor frecuencia resultado de una infección bacteriana o vírica del intestino. Cuando estos síntomas se convierten en repetitivos o crónicos y no se puede identificar ningún organismo infeccioso, tienen que investigarse otras posibles causas.

En el Hospital Clínico Infantil de Londres pude demostrar, con mis colegas Lawrence J. Youlten y Maurice H. Lessof, que en algunos casos la causa residía en una alergia a un alimento específico. Pensemos que la relación entre molestias intestinales y un alimento, la leche, fue reconocida hace más de dos siglos por un renombrado paciente, alérgico a la leche, y no por los médicos. Un cronista llamado Sullivan apuntó el hecho de que Carlos Estuardo ("Bonnie Prince Charlie"), pretendiente al trono británico, sufría de un "flujo sangrante" (diarrea hemorrágica) y llegó a asociar sus síntomas con la ingestión de la leche. "El Príncipe no volvió a beber leche, tomaba agua y se encontraba en un estado envidiable."

Nuestro descubrimiento arrancó de la observación a que se había estado sometiendo a unos pacientes con colitis ulcerosa. Este grave trastorno se venía tratando a lo largo de casi 30 años con el fármaco sulfasalazina, una combinación de sulfapiridina y ácido 5-aminosalicílico, un análogo de la aspirina. En 1977, A. K. Khan, J. Piris y S. C. Truelove descubrieron que los pacientes que respondían a esta droga, bastante tóxica, respondían con igual éxito al componente tipo aspirina, el salicilato, solo. El descubrimiento nos interesó mucho: un trastorno que respondía favorablemente a la aspirina y sus análogos vendría mediado quizá por las prostaglandinas, cuya síntesis inhibían. Nos propusimos averiguar si la inhibición de las prostaglandinas ayudaría a los pacientes alérgicos que manifestaban síntomas intestinales por ingerir ciertos alimentos.

Un grupo de voluntarios, alérgicos a algún alimento, descubrieron que tomando aspirina corriente antes de ingerir lo que les causaba la diarrea y cólico podían comer o beber ese alimento sin peligro. En vista de ello, dirigimos nuestra investigación hacia un grupo de pacientes cuya colitis ulcerosa respondía a la sulfasalazina, pero cuyos síntomas no se asociaban a la alergia. Les tratamos con una dieta sencilla que excluía alimentos implicados en alergias intestinales. En cierto número de enfermos, la colitis respondió bien a la eliminación de los alimentos sospechosos y recurría cuando estos alimentos volvían a incluirse en la dieta; esta recurrencia se evitaba mediante la toma de aspirina antes de comer o beber. La dieta experimental y el tratamiento con aspirina funcionó bien, asimismo, en algunos pacientes con un síndrome intestinal menos agudo, denominado colitis espástica o colon irritable.

Youlten y David Heinzelmann corroboraron los indicios de que las prostaglandinas intervenían en las alergias intestinales. Demostraron que a la ingesta de los alimentos alergénicos seguía un flujo de prostaglandinas hacia el intestino y un aumento del nivel de los componentes de las prostaglandinas en la sangre, acompañados de cólicos y diarreas. La secreción de prostaglandinas y los síntomas se mitigaban mediante el tratamiento con aspirina o con alguno de sus análogos. Estudios posteriores sugirieron que otras enfermedades diarreicas –estados agudos o crónicos y alérgicos o no alérgicos– implicaban una liberación de prostaglandinas y podían mejorar con aspirina. Pero, llegados aquí, se impone un inciso de advertencia. No existe prueba alguna de que las reacciones alérgicas en partes del cuerpo distintas del intestino se mitiguen con aspirina, ni con sus análogos. Al contrario, estas drogas pueden incluso provocar asma en individuos sensibles.

Tratamiento

La eficacia que la aspirina ha mostrado en la terapia de síntomas alérgicos intestinales induce a pensar que quizá valga para tratar otras reacciones alérgicas mediadas por prostaglandinas. Pero no se ha podido comprobar hasta la fecha. En algunas reacciones alérgicas, cabe que a las prostaglandinas les competa un papel secundario, de refuerzo de la acción de los mediadores. Cuando se induce en la piel una reacción experimental tipo eritemo-ampolloso por la inyección de histamina, la aplicación concomitante de la prostaglandina E_2 incrementa diez veces el grado de picor. Sin embargo, bajo condiciones clínicas, la aspirina no alivia el picor alérgico. De vez en cuando, las drogas antihistamínicas ayudan en el tratamiento de la urticaria, pero no en el tratamiento del eccema, que es un importante síntoma de la dermatitis por contacto. La dermatitis por contacto es una reacción celular de hipersensibilidad retardada, cuyo picor y dolor vienen causados primordialmente por linfocinas o algún otro producto de los linfocitos T, y no por la IgE y los mediadores de las células cebadas. Las únicas drogas activas en el tratamiento de tal reacción son las hormonas corticoste-

NI PROSTAGLANDINAS NI LEUCOTRIENOS se almacenan en los mastocitos. Ambos mediadores de la reacción alérgica se sintetizan sobre todo en diversos leucocitos (glóbulos blancos), y se fabrican cuando el ácido araquidónico se forma a raíz de la rotura de la membrana celular por causa de un traumatismo, una infección, un estímulo hormonal o cualquier otro episodio asociado con la respuesta alérgica. El enzima fosfolipasa convierte las moléculas de fosfolípidos de la membrana celular en ácido araquidónico. La ciclooxigenasa (cuya actividad inhiben la aspirina y sus análogos) inicia la vía de las prostaglandinas (*izquierda*). La lipoxigenasa, la vía de los leucotrienos (*derecha*). Los leucotrienos C_4, D_4 y E_4 constituyen juntos el constrictor de bronquiolos pequeños, la sustancia anafiláctica de reacción lenta (*SRS-A*).

roides, que (en grandes dosis durante mucho tiempo) pueden producir efectos secundarios tan peligrosos como la propia lesión que se desea curar.

En el caso de la fiebre del heno, el repertorio de respuestas se limita al prurito de los ojos y conductos nasales, estornudos y a la secreción de agua (lágrimas y moco). Estas respuestas están mediadas en gran parte por histamina. La verdad es que los antihistamínicos suelen revelarse eficaces contra la mayoría de los síntomas de la fiebre del heno; pero no son activos contra el asma, que es un trastorno de las vías respiratorias bajas. Algunas prostaglandinas ejercen un efecto constrictivo sobre los grandes bronquios, mas en la mayoría de los enfermos de asma la aspirina carece de eficacia, cuando no empeora su evolución. Se cree hoy que tal vez sean los leucotrienos, con su poderoso efecto constrictor sobre las células del músculo liso de los bronquiolos pequeños, los mediadores más importantes en el asma. Hasta la fecha no se dispone de ninguna droga antileucotrieno. Habiéndose determinado ya la estructura de estos mediadores, se están llevando a cabo intensos esfuerzos para descubrir los agentes que pueden bloquear su síntesis o su actividad. El descubrimiento de tal droga representaría sin duda un importante avance en el tratamiento del asma.

Se receta frecuentemente cromoglicato sódico para tratar la fiebre del heno y el asma alérgico. Se espera que impida la entrada de iones calcio en los mastocitos después de la interacción entre la IgE y un alérgeno, obstruyendo así la cadena de sucesos que culmina con la desgranulación. Pero hay que administrar el fármaco antes de que el antígeno se ligue al mastocito. Una vez que se inicia la desgranulación no hay nada que la frene. Por tanto, el cromoglicato debe administrarse como medida preventiva cuando se espera un encuentro con un alérgeno. Lo mismo ocurre con algunas otras drogas que impiden la desgranulación de los mastocitos: los corticosteroides (que estabilizan las membranas de los gránulos y de las células) o los agentes que aumentan la acumulación de la molécula reguladora adenosín monofosfato cíclico (AMP cíclico). En cuanto los gránulos hayan liberado su contenido, el tratamiento debe encaminarse a bloquear los efectos de los mediadores sobre los tejidos que les sirven de blanco o a contrarrestar las acciones de dichos intermediarios. En esta etapa es cuando los antihistamínicos surten efecto. Los corticosteroides, la adrenalina y sus análogos y la aspirina (en algunos casos especiales) pueden resultar también beneficiosos.

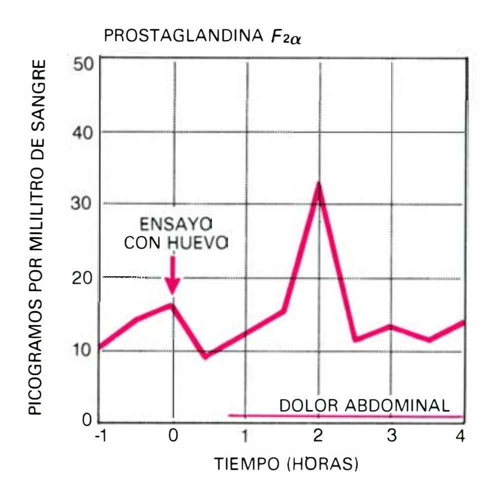
Ni que decir tiene que más vale prevenir que curar: el tratamiento ideal para la alergia es evitar el contacto con el alérgeno. Pero ello no siempre es posible. Bueno sería luego, tratar al paciente para que el contacto con un potencial alérgeno no genere una respuesta alérgica. La técnica más practicada es la de la desensibilización, método diseñado en la Facultad de Medicina del Hospital St. Mary de Londres a principios de siglo. Se administran pequeñas cantidades del antígeno responsable, normalmente en una serie de inyecciones, para estimular la síntesis, por parte del sistema inmunitario, de anticuerpos IgG (no IgE) contra el antígeno. La razón subyacente de tal proceder es que, una vez el paciente encuentre espontáneamente el antígeno, la IgG se combinará con el antígeno y se bloqueará la unión con la IgE de los mastocitos.

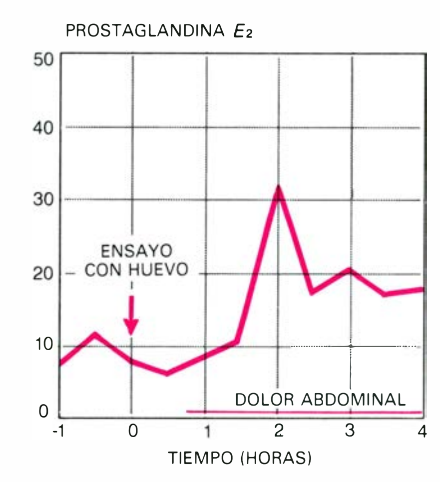
La desensibilización parece ser eficaz sobre todo en pólenes asociados con la fiebre del heno y en venenos de abeja y avispa. Tiene un éxito limitado en pacientes asmáticos y carece de eficacia contra las alergias alimentarias y las reacciones alérgicas de hipersensibilidad retardada (celulares). Aun cuando les acompaña el éxito, se desconoce el modo real de acción de las inyecciones antialérgicas. El nivel de IgG –el supuesto anticuerpo bloqueador– en un paciente no parece guardar ninguna correlación con el grado de desensibilización. Hay pacientes que muestran una respuesta favorable y tienen poca IgG alérgeno-específica en la sangre y los hay para quienes las inyecciones resultan inútiles a pesar de llevar grandes cantidades. Por tanto, la síntesis de "anticuerpo bloqueador" no explica de forma satisfactoria los casos en que la desensibilización constituye un éxito. No puede negarse que existe ahí un importante efecto placebo.

Citemos otros inconvenientes relacionados con las inyecciones antialérgicas. No es fácil preparar a escala comercial vacunas desensibilizadoras en un estado suficientemente puro y con una potencia estandarizada. Más aún, las inyecciones pueden generar reacciones alérgicas agudas, locales o sistémicas, que, en ciertas ocasiones, pueden ser mortales. Por todos estos motivos, muchos médicos consideran el tratamiento de desensibilización con bastantes reservas.

El estado alérgico

Puesto que drogas y tratamientos de otro tipo para combatir las reacciones alérgicas específicas presentan algún inconveniente, quizá valiera la pena plantearse un enfoque directo de la terapia: el que bloqueara el desarrollo del estado atópico en el individuo. Requiere ello un mayor conocimiento de los factores que predisponen al estado alérgi-







ALERGIA A LA ALIMENTACION. Se reveló en un paciente que manifestaba dolores abdominales y diarrea tras haber comido huevos. Se registró una subida en el nivel en sangre de las prostaglandinas $F_{2\alpha}$ y E_2 concomitante con otra en el producto de la degradación de las protaglandinas dehidroceto-$F_{2\alpha}$. Cuando se administró aspirina antes del ensayo con huevo, no aumentó la concentración de prostaglandinas ni se detectaron síntomas intestinales.

co, a fin de obviarlos o suprimirlos. Las alergias tienden a darse en un contexto familiar; una persona alérgica tiene mayor probabilidad de tener parientes alérgicos de lo que puede esperarse por azar. Por tanto, deben influir factores genéticos o del entorno doméstico. El modo de herencia de la susceptibilidad alérgica sigue siendo un tema debatido. Algunos investigadores creen disponer de pruebas que responsabilizan a un solo gen, pero no se ponen de acuerdo a la hora de establecer si el gen es dominante o recesivo. Otros opinan que el estado alérgico es poligénico: transmitido por varios genes cuya expresión combinada es necesaria para convertir en alérgico a un individuo.

La complejidad genética tiene que ver con el hecho de que la alergia, al igual que otros muchos estados incuestionablemente hereditarios, exhibe "penetración incompleta" o expresión genética variable. Dos personas pueden tener ambas el gen o los genes que determinan el estado alérgico y sus medios ambientes ser similares, y sólo una manifestar signos clínicos de alergia. Datos de un estudio sueco realizado con hermanos gemelos sugieren que un 18 por ciento de la población porta el gen o los genes de la alergia y que la penetración es aproximadamente del 40 por ciento: menos de la mitad de los que son alérgicos hereditarios manifiestan su estado clínicamente. Otro estudio llevado a cabo en los Estados Unidos demostró que dos padres alérgicos (una combinación cuya frecuencia no llegaba al 1 por ciento en el grupo experimental) tenían un 58 por ciento de posibilidades de que un hijo suyo fuera alérgico; en los casos en que uno de los padres era clínicamente alérgico, el riesgo de que su hijo lo fuera se cifraba en un 38 por ciento; si ninguno de los dos padres era alérgico (aunque uno o ambos podrían haberlo sido sin manifiestarlo en el caso de que el rasgo fuera recesivo) el riesgo llegaba al 12,5 por ciento.

La diferencia entre la herencia de genes alérgicos y la expresión de los mismos no sólo responde al grado de penetración inherente, sino también a factores del medio ambiente, en particular los que rodean al recién nacido. Un factor de enorme importancia parece ser el método de lactancia: leche materna o artificial. Hace ya decenios que se sabe que los niños alimentados exclusivamente con leche materna tienen menos probabilidad de padecer infecciones gastrointestinales que los que se nutren de leche de vaca o de algún preparado basado en la leche de vaca; y tienen, también, menos probabilidades de padecer alergias. Quizás existe alguna conexión entre estas dos observaciones.

Ya en 1934, Clifford G. Grulee, de la Facultad de Medicina Rush de Chicago, demostró que, de una muestra de 20.000 recién nacidos, el 36 por ciento de los alimentados solamente con leche materna sufrieron infecciones neonatales de tipo respiratorio o gastrointestinal. En cambio, entre los alimentados con preparados comerciales, el porcentaje subía hasta 63 por ciento. El estudio es anterior al descubrimiento de los antibióticos y, mientras que sólo el 0,13 por ciento de los niños alimentados exclusivamente con leche materna murieron por enfermedades infecciosas durante el período neonatal, en los alimentados con biberón la cifra alcanzó el 7,56 por ciento. Presumiblemente la leche materna ofrece protección ante las infecciones suministrando anticuerpos contra bacterias y virus patógenos durante un período en que las defensas inmunológicas intestinales del recién nacido aún no están totalmente desarrolladas.

Leche materna y alergia

En 1970, John A. Walker-Smith, del Hospital Infantil Queen Elizabeth de Londres, demostró que las infecciones gastrointestinales infantiles se relacionaban directamente con la manifestación subsiguiente de enfermedades alérgicas. En 1976 estudiamos la historia alimentaria neonatal y la predisposición genética a la alergia de 72 niños con una edad mínima de cinco años, todos ellos alérgicos a la leche de vaca. En el grupo más numeroso (el 60 por ciento de los niños), todos tenían por lo menos un padre alérgico y se habían alimentado con biberón en su primera infancia; el 26 por ciento presentaban una historia de alergia en la familia, pero se habían alimentado con la leche materna; el 14 por ciento tenían padres no alérgicos y se habían alimentado con biberón; no había ninguno que se hubiera alimentado con la leche materna y que no tuviera ningún padre alérgico. En otras palabras, la combinación de la historia parental de alergia y la ingestión precoz de leche de vaca eleva enormemente el riesgo de alergia subsiguiente a la leche de vaca.

¿Qué explicación se puede dar a todas estas observaciones? Bajo circunstancias normales, en individuos maduros, muy poca proteína extraña de la ingesta atraviesa la pared intestinal y entra en el flujo sanguíneo, donde puede encontrar células *B* e inducir una respuesta inmunológica. La mayoría de la proteína de los alimentos se degrada en el estómago y el intestino delgado, formando péptidos y aminoácidos individuales; son estos productos de la degradación, que no son antigénicos, los que entran en el flujo sanguíneo. El sistema inmunitario tolera, aparentemente, la poca proteína que suele entrar en la sangre. Sin embargo, si atraviesa la pared epitelial del intestino demasiada proteína, el sistema inmunológico puede sensibilizarse, produciendo una respuesta alérgica.

Quizá la infección gastrointestinal dañe el revestimiento del intestino, facilitando el paso de las proteínas a través de la pared. Ello representaría un posible eslabón entre la alimentación con biberón (que aumenta la susceptibilidad a la infección) y las alergias intestinales subsiguientes. En ausencia incluso de infección, cabe que el intestino del recién nacido sea hiperpermeable a las proteínas alimenticias, como es el caso en muchos animales recién nacidos. Si así es, el contacto neonatal con proteínas extrañas (la leche de vaca) puede ser alergénico, y no serlo el contacto con las proteínas de la leche materna. También es probable que haya factores en la leche materna que ayuden a revestir el epitelio intestinal del recién nacido, impermeabilizándolo al paso de proteínas extrañas; este fenómeno está bien documentado en otros mamíferos. Por ausencia de esos factores impermeabilizantes, un recién nacido alimentado con biberón podría quedar expuesto, en un fase más avanzada de su vida, a proteínas que, de otra suerte, nunca se le presentarían. Tales efectos adquieren, tal vez, una importancia mayor en individuos predispuestos genéticamente a la alergia. Cualesquiera que sean las conexiones entre la alimentación con biberón y la alergia, muchos pediatras han llegado a la conclusión de que el recién nacido, sobre todo aquel cuyos padres o hermanos sean clínicamente alérgicos, no debe tomar ningún tipo de leche que no sea la materna hasta pasados los primeros tres o siete días.

Quizá se termine por saber cómo inhibir la producción de IgE una vez iniciada, cómo impedir la unión de IgE al mastocito, o incluso cómo remediar el defecto en la regulación de las células *B* que conduce a la producción de IgE. Los objetivos más inmediatos deben ser el desarrollo de una auténtica capacidad para la desensibilización y el descubrimiento de fármacos que neutralicen a los leucotrienos y sean más eficaces contra los mediadores químicos liberados por los gránulos de los mastocitos.

Difusión superficial

Aunque los átomos o moléculas están fuertemente ligados a la superficie de un metal, se pueden mover en dos direcciones. A bajas temperaturas, el desplazamiento se realiza mediante un mecanismo basado en el efecto túnel

Robert Gomer

A escala atómica, hasta la superficie más lisa de un metal tiene el aspecto de un terreno ondulado y abrupto. Dado que los átomos de la superficie no se pueden subdividir, recuerda esa superficie a una capa de bolas de billar, resultante de cortar un conjunto tridimensional de esferas a lo largo de un plano. Cuando los átomos de un metal se encuentran en una superficie, algunos de los enlaces que los unen a otros átomos del resto del sólido se rompen; en virtud de lo cual, la capacidad de enlace de los átomos superficiales no se halla totalmente saturada. Una superficie metálica limpia es una región altamente reactiva, capaz de formar enlaces muy fuertes con la mayoría de los átomos. Dicha superficie puede llegar incluso a romper una molécula en sus átomos constituyentes o en fragmentos moleculares.

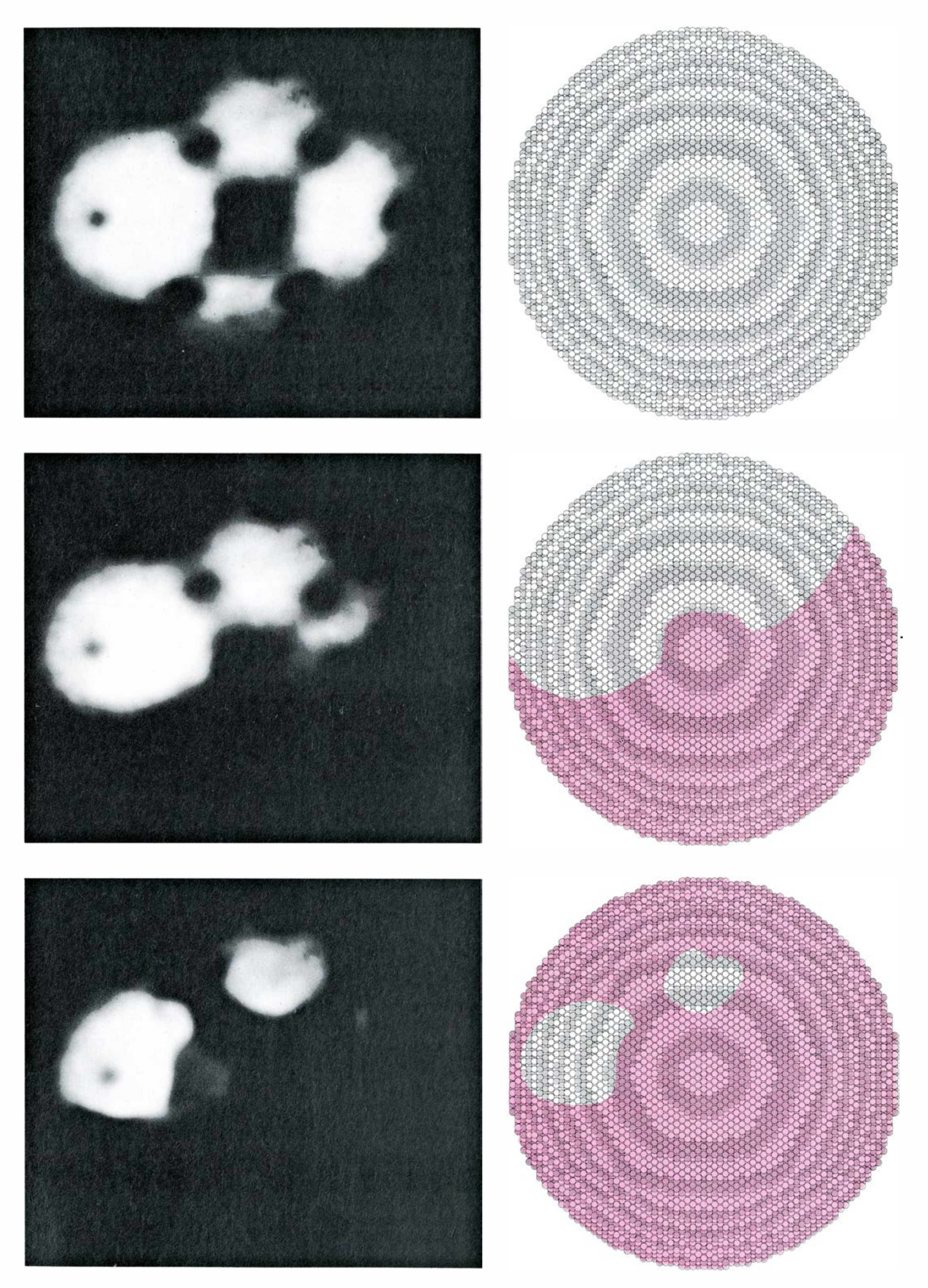
A pesar de la contextura que presentan las superficies de los cristales, los átomos o moléculas que se adsorben en dichas superficies se pueden mover a lo largo de ellas bajo determinadas circunstancias. El movimiento de las partículas adsorbidas se denomina difusión superficial; el estudio de este movimiento pone de manifiesto ciertas características de los enlaces de dichas partículas que no se pueden estudiar por ningún otro procedimiento. Cuando las partículas adsorbidas se difunden a lo largo de una superficie, la intensidad del enlace que las mantiene unidas a la misma varía de un lugar a otro. La explicación de este hecho se basa en que esa intensidad depende de la disposición en que se encuentran los átomos que constituyen los diferentes planos superficiales de una determinada sustancia. Por otra parte, los átomos o moléculas adsorbidos pueden interaccionar entre sí; las consecuencias de las interacciones que se producen como resultado de la difusión conducen a observaciones todavía más fascinantes. Ocuparnos de la difusión de átomos a lo largo de una superficie constituye la mejor aproximación a un sistema estrictamente bidimensional de que podemos disponer en la actualidad. La teoría predice que los sistemas bi y tridimensionales difieren en ciertas propiedades fundamentales, tales como la forma en que pueden ordenarse y la forma en que conducen el calor y la materia. La difusión superficial permite investigar todas estas diferencias.

La difusión superficial es también un paso importante en muchas reacciones químicas catalizadas por superficies. La disociación de una molécula superficial requiere una energía mucho menor que la necesaria en el caso de un líquido o un gas, dado que los fragmentos moleculares se pueden enlazar a la superficie en cuestión liberando una cierta energía. En muchas de estas reacciones, algunos de los fragmentos moleculares se difunden a lo largo de la superficie hasta encontrarse con otras partículas adsorbidas con las que se combinan para formar nuevas moléculas. Si las nuevas moléculas no están fuertemente ligadas a dicha superficie, pueden abandonarla y dejar un espacio disponible para nuevos reactivos. Por ejemplo, en el convertidor catalítico del tubo de escape de un automóvil, una capa fina de platino u otro metal disocia las moléculas de oxígeno y adsorbe tanto a los átomos de oxígeno como a las moléculas de monóxido de carbono. La movilidad de los átomos de oxígeno y de las moléculas de monóxido de carbono es lo suficientemente grande como para que los dos tipos de partículas se pongan en contacto y reaccionen y formar así dióxido de carbono. Las moléculas de dióxido de carbono abandonan entonces la superficie metálica.

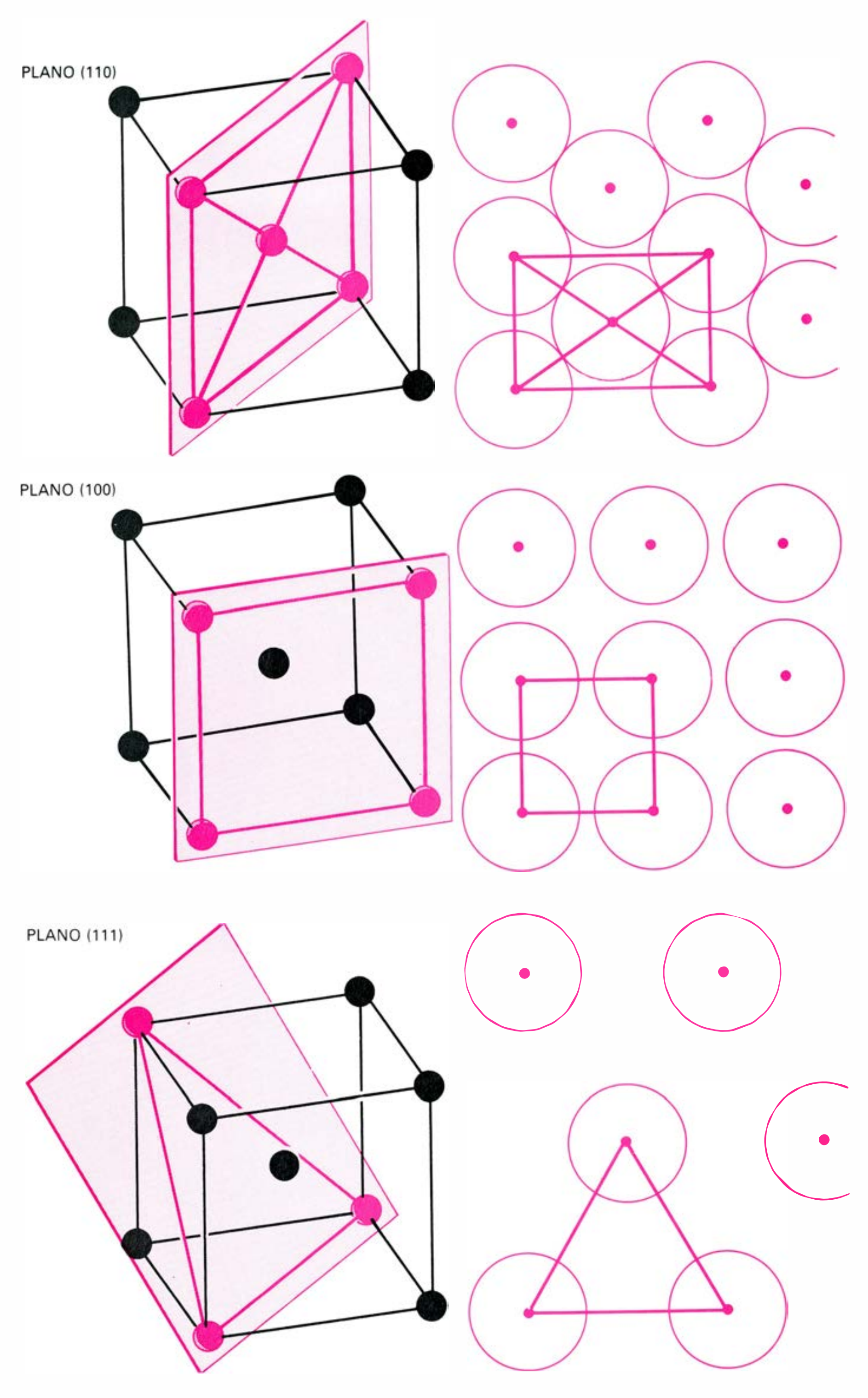
Los sólidos metálicos ordinarios son cristalinos, es decir, sus átomos están ordenados formando una secuencia regular de unidades básicas; una de las más sencillas es la estructura cúbica, típica del tungsteno y de otros metales. En este caso, la unidad estructural básica consiste en una serie de átomos situados en los ocho vértices y en el centro de un cubo. Un conjunto de cubos apilados constituye una red cristalina regular. Un corte plano a través de la red puede ser paralelo a una de las caras del cubo o puede formar cualquier ángulo con dicha cara. En consecuencia, quedarán expuestos a la superficie unos conjuntos diferentes de átomos. La forma de los cortes se suele designar mediante un sistema de índices. Sin embargo, si lo que pretendemos es analizar la difusión superficial, basta tener presente que la densidad y la disposición de los átomos del metal en el plano superficial dependen de la orientación del corte respecto a la red cristalina.

Los diferentes planos superficiales interaccionan de forma distinta con las moléculas de una sustancia adsorbida. Consideremos, por ejemplo, una molécula diatómica de hidrógeno. Los dos

DIFUSION DE ATOMOS DE HIDROGENO sobre la punta semiesférica de una aguja de tungsteno, mostrada en tres etapas sucesivas en las micrografías que se reproducen a la izquierda. Estas imágenes se han obtenido con un instrumento denominado microscopio de emisión de campo. A la derecha se esquematiza ese mismo proceso. Cada una de las esferas representa un átomo de tungsteno; los átomos de hidrógeno aparecen coloreados. La microfotografía de la parte superior muestra la superficie limpia del cristal de tungsteno que constituye la punta de la aguja. El cuadrado oscuro que aparece en el centro y los otros puntos oscuros corresponden a otras tantas facetas planas del cristal; en estas zonas los átomos expuestos a la superficie están empaquetados de forma compacta. En la microfotografía del centro la mitad inferior de la punta de la aguja está cubierta por átomos de hidrógeno a 20 grados Kelvin y aparece oscura. Abajo, el emisor se ha calentado hasta 190 grados Kelvin y los átomos de hidrógeno se difunden a lo largo de la superficie. Las regiones invadidas por el hidrógeno aparecen oscuras. El límite de la difusión se mueve en forma radial a partir de la faceta central. El aumento es de unos 300.000 diámetros.



núcleos de hidrógeno que constituyen esta molécula comparten dos electrones, reduciendo la energía total de los átomos y formando un enlace químico. Para que dos atomos puedan formar un enlace es necesario que el núcleo de uno de ellos comparta algunos electrones con el núcleo del otro. Las moléculas se pueden unir a átomos, sólidos u otras moléculas mediante un mecanismo de este tipo. Sin embargo, en el caso del hidrógeno molecular, la capacidad de enlace de los dos núcleos atómicos está completamente saturada por los dos electrones que comparten y, por consiguiente, dicha molécula no puede formar enlaces fuertes con nada.



LOS DIFERENTES PLANOS de una red atómica regular cortan a dicha red de manera que en la superficie de un cristal puedan existir estructuras atómicas diferentes. Los átomos de la superficie pueden estar empaquetados de forma compacta, como sucede con el plano (110) (*arriba*), o más separados entre sí, como sucede con el plano (100) (*centro*) y con el plano (111) (*abajo*). Estos planos constituyen las diferentes facetas del cristal; cada uno de ellos posee una simetría diferente. La estructura cristalina que se presenta aquí es típica del tungsteno y de otros metales. Se trata de una estructura cúbica centrada en el espacio, cuya unidad básica consta de un cubo con un átomo en cada vértice y otro en el centro.

Por otro lado, un átomo de hidrógeno se puede enlazar fuertemente con la mayoría de las superficies metálicas dado que puede compartir su único electrón con los átomos del metal. Si la energía que se libera al formar los enlaces superficiales es mayor que la que se necesita para romper el enlace entre los dos átomos de hidrógeno, las moléculas de hidrógeno diatómicas tenderán a disociarse en la superficie del metal.

Para iniciar el proceso de disociación es necesario aportar cierta cantidad de energía; esta energía puede obtenerse a partir de la energía térmica de los átomos del metal. La mayoría de las superficies para las que la disociación es favorable pueden disociar una molécula diatómica como el H_2, incluso a bajas temperaturas. Sin embargo, algunos cristales con una superficie relativamente lisa a escala atómica retienen a las moléculas de H_2 tan débilmente que la temperatura necesaria para que se desadsorban, es decir, para que abandonen dicha superficie, resulta ser menor que la temperatura necesaria para que se produzca su disociación. En consecuencia, las moléculas de hidrógeno no se podrán disociar sobre tales superficies aunque los átomos de hidrógeno estén fuertemente enlazados a ellas. Una forma de que los átomos puedan alcanzar una superficie es por difusión desde superficies próximas capaces de separar las moléculas diatómicas.

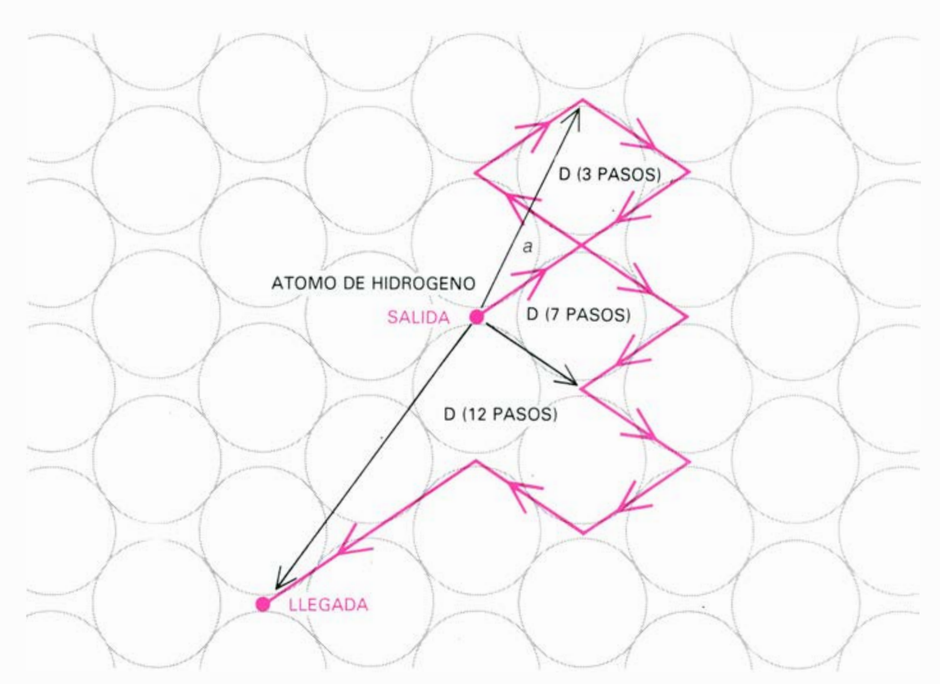
La adsorción de átomos o moléculas sobre una superficie como consecuencia de la formación de enlaces químicos se llama quimiadsorción. En muchos aspectos, los enlaces entre una superficie y una sustancia quimiadsorbida se parecen a los enlaces de una molécula pequeña; por ejemplo, las energías necesarias para romper los enlaces de ambos tipos son comparables. No obstante, en una molécula pequeña el número de átomos es constante y los átomos permanecen fijos en el espacio los unos respecto a los otros, excepto para pequeñas vibraciones en sus posiciones de equilibrio. Sobre una superficie metálica, el número de átomos adsorbidos puede variar entre cero y el número necesario para cubrir toda la superficie con una capa monoatómica. La densidad superficial de estas capas es del orden de 10^{15} átomos adsorbidos por centímetro cuadrado.

La regularidad con que están dispuestos los átomos que constituyen la superficie de un metal crea muchos lu-

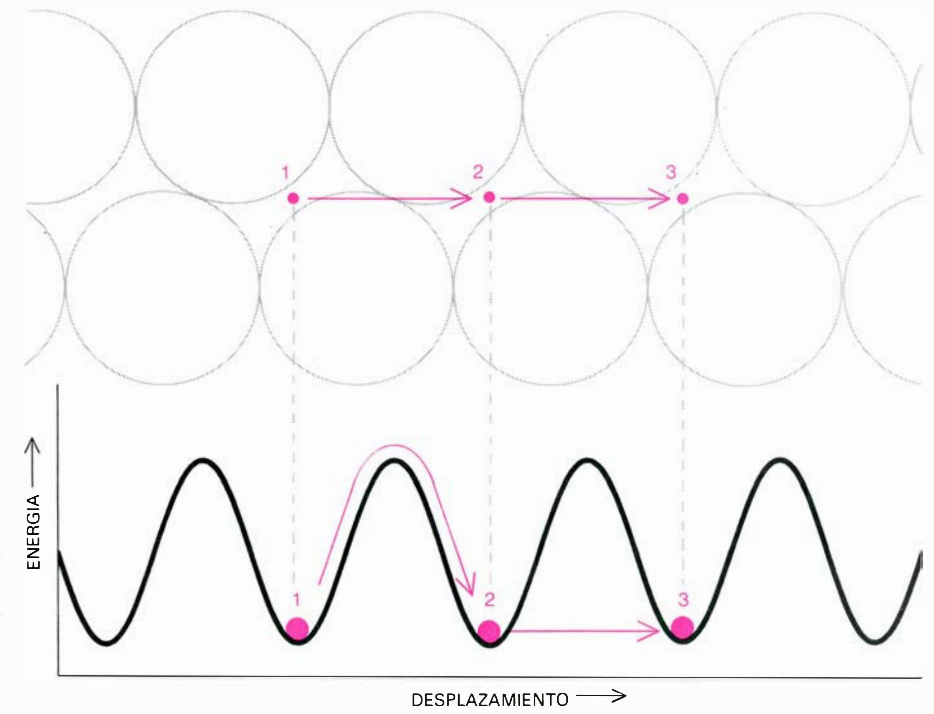
gares energéticamente equivalentes para la adsorción. La posición exacta de los lugares óptimos varía con la naturaleza del sustrato y de los átomos adsorbidos. Algunos átomos adsorbidos se enlazan más fuertemente en la parte superior de un átomo del sustrato, en tanto que otros se aprovechan de los huecos existentes entre dichos átomos. A pesar de estas diferencias, los átomos adsorbidos se enlazan bastante fuertemente en cualquier lugar de la superficie de un metal. Por esta razón, la difusión superficial es posible sin que se produzca una desadsorción.

Es conveniente representar a los átomos adsorbidos sobre una superficie de energía potencial cuya altura en un lugar dado constituye una medida de la energía de enlace que un átomo adsorbido tendría en ese lugar. Sobre esta superficie de energía potencial, las regiones donde los enlaces son más fuertes corresponden a valores mínimos de la energía y las regiones donde los enlaces son más débiles corresponden a valores máximos de la energía. La figura de mínimos y máximos alternados tiene la misma regularidad y simetría que la propia superficie atómica. Para moverse desde un mínimo de energía al siguiente, un átomo no necesita escalar el máximo interpuesto; en lugar de ello, puede tomar el camino que requiera una escalada mínima moviéndose a lo largo de los collados, o puntos de ensilladura, que unen a los pozos considerados.

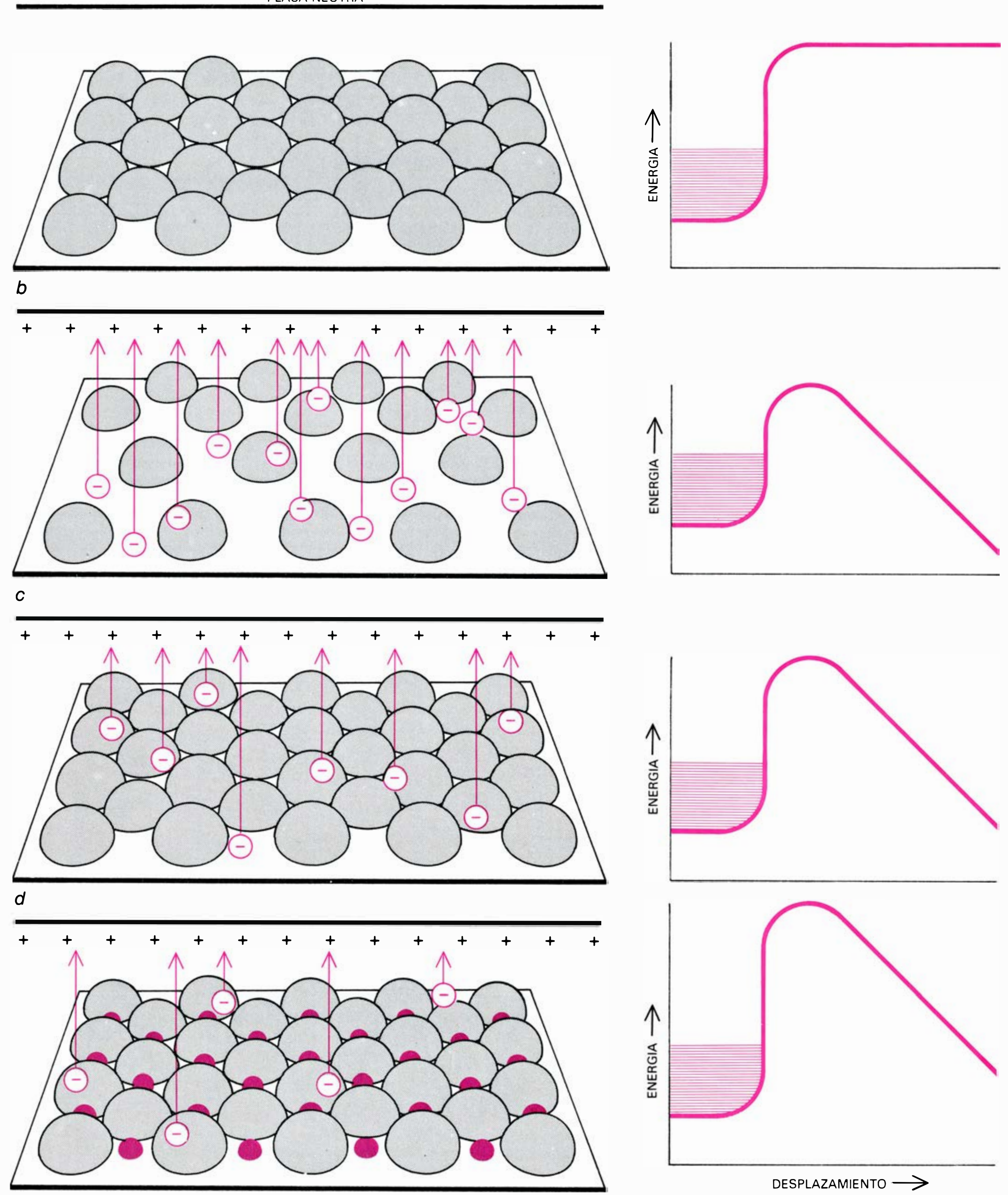
¿Cuál es el mecanismo por el que los átomos adsorbidos adquieren la energía necesaria para escalar uno de esos collados? Para cualquier temperatura por encima del cero absoluto, los átomos de la sustancia base y de la sustancia adsorbida vibran al azar respecto a sus posiciones de equilibrio. La mayoría de las vibraciones de los átomos adsorbidos tienen una amplitud pequeña, pero ocasionalmente un empujón grande o varios empujones simultáneos procedentes del sustrato pueden proporcionar al átomo adsorbido una energía suficiente para remontar el collado. Cuando un átomo se desliza hacia abajo, al otro lado de la barrera, en su camino entre un pozo y otro, suele perder su energía rápidamente y resulta atrapado; en tal caso, el proceso a través del cual se gana energía debe empezar de nuevo. En cada uno de los saltos sucesivos, la probabilidad de que el átomo alcance cualquiera de los pozos accesibles, incluyendo aquél del que procede, es exactamente la misma. Dado que la energía impartida a un átomo adsorbido depende de la temperatura,



MOVIMIENTO AL AZAR de un átomo adsorbido sobre los átomos de una superficie. Se parece al de un borracho cuando intenta alejarse de una farola. El átomo adsorbido puede minimizar su energía en muchos lugares equivalentes a lo largo de su trayectoria; en estos lugares dicho átomo está fuertemente ligado a la superficie. Para moverse de un lugar a otro, el átomo debe ganar la suficiente energía por vibración térmica de la red sobre la que se mueve como para poder superar una barrera de energía. Sin embargo, una vez se ha realizado dicho salto, el átomo adsorbido devuelve esa energía a la red. Cada salto es, pues, independiente de los anteriores y, por tanto, el átomo se mueve en una dirección al azar desde cada uno de sus emplazamientos (de forma análoga a como el borracho puede avanzar en una dirección diferente cada vez que da un nuevo paso). El cuadrado de la distancia más probable que separa al átomo de su posición de partida es proporcional al número de saltos realizados. En relación con este modelo de movimiento al azar, se define una magnitud denominada coeficiente de difusión, cuyo valor representa una medida del recorrido cuadrático medio de un átomo adsorbido por una unidad de tiempo.



ESTE DIAGRAMA DE ENERGIA POTENCIAL muestra la cantidad de energía asociada con cada una de las posiciones posibles de un átomo de hidrógeno adsorbido y en reposo sobre una superficie compacta de átomos de tungsteno con una configuración (110). De acuerdo con las leyes de la mecánica clásica, es decir, no cuántica, una partícula adsorbida se podrá mover de un pozo de energía a otro solamente en el caso de que adquiera la energía cinética suficiente para superar el paso que separa a los dos pozos (*véanse las flechas desde el punto* 1 *hasta el punto*2). Sin embargo, de acuerdo con la mecánica cuántica, la posición de la partícula adsorbida no se puede determinar con una precisión absoluta; existe alguna probabilidad de que dicha partícula se encuentre en cualquier lugar del espacio. Concretamente, hay probabilidad de que una partícula que se encuentre en un pozo de energía esté también en un pozo próximo sin haber adquirido la energía suficiente para superar la barrera de energía (*flechas desde el punto 2 hasta el punto 3*). En tal caso se dice que la partícula ha atravesado la barrera por el efecto túnel.



EMISION DE ELECTRONES por parte de una superficie metálica en un campo eléctrico intenso; depende de la densidad de los átomos metálicos en la superficie y de la proporción en que dicha superficie está cubierta por átomos adsorbidos. Los electrones de un metal ocupan muchos niveles energéticos discretos y poco espaciados entre sí (*líneas horizontales en los gráficos de la derecha*). En ausencia de un campo eléctrico (*a*), los electrones no abandonan la superficie debido a la imposibilidad de remontar la barrera de energía potencial de dicha superficie y debido a que dicha barrera es infinitamente gruesa. Pero si se aplica un campo eléctrico intenso, la energía potencial del exterior de la superficie disminuye y, por tanto, la barrera de energía que confina a los electrones en el metal posee una altura y una anchura finitas (*b*). Los electrones pueden entonces escapar del metal atravesando dicha barrera por efecto túnel. Cuando los átomos de la superficie están muy compactos (*c*), la barrera de energía es más elevada y el flujo de electrones es menor. Cuando dicha superficie está recubierta por una sustancia adsorbida (*d*), la barrera de energía es más alta que antes y el flujo de electrones es todavía menor.

el número de saltos que se ven coronados por el éxito aumenta rápidamente a medida que lo hace la temperatura.

El movimiento de un átomo adsorbido a lo largo de la correspondiente superficie se denomina difusión y la trayectoria resultante es un paseo al azar. Esta trayectoria recuerda el movimiento sin rumbo de un borracho que parte de una farola y cuyos pasos pueden llevarle en cualquier dirección. Si la farola se encuentra en un gran espacio abierto, cabe esperar que el borracho dé igual número de pasos hacia el Este como hacia el Oeste y hacia el Norte como hacia el Sur; en consecuencia "no va a ningún sitio". Sin embargo, el borracho cubre un territorio cada vez mayor a medida que progresan sus rodeos; por término medio, el área que cubre es un círculo cuyo centro es la farola. El cuadrado del radio del círculo, conocido por recorrido cuadrático medio, es igual al número total de pasos que ha dado multiplicado por el cuadrado de la longitud de cada paso. En consecuencia, cuando ha transcurrido un tiempo infinito, el borracho se puede encontrar con igual probabilidad en cualquier punto de la superficie de que dispone.

Por lo que respecta al átomo adsorbido, el número de saltos que se producen en un tiempo dado es igual a la frecuencia media de dichos saltos multiplicada por el tiempo en cuestión. Por tanto, calcularemos el recorrido cuadrático medio multiplicando el cuadrado de la longitud de un salto por la frecuencia de los saltos y por el tiempo. Longitud de los saltos y frecuencia de los mismos son propiedades características del conjunto constituido por el sustrato base y la sustancia adsorbida; no así el tiempo. Conviene, pues, definir una magnitud conocida como coeficiente de difusión, capaz de describir dicho proceso pero con independencia del tiempo. El coeficiente de difusión es igual a la cuarta parte de la frecuencia del salto multiplicada por el cuadrado de su longitud.

El coeficiente de difusión es una medida de la probabilidad de que una partícula adsorbida se desplace de su posición inicial. Si la partícula adsorbida no está aislada, sino que interacciona con otras partículas igualmente adsorbidas en la misma superficie, el proceso de difusión se hace más complejo. A medida que el número de tales partículas aumenta, se van ocupando muchos de los lugares para los que el enlace es estable; en general, una partícula adsorbida no puede situarse en un lugar ya ocupado por otra. Por otro lado, la interacción de una partícula adsorbida con la superficie base puede afectar al movimiento de otras partículas adsorbidas. A pesar de todos estos hechos, el coeficiente de difusión para un conjunto de partículas adsorbidas es similar al de una partícula aislada. En ambos casos, el coeficiente viene determinado por la naturaleza del adsorbente y del adsorbido, por la topografía del adsorbente y por la temperatura a la que el proceso tiene lugar.

¿Cómo podemos estudiar una difusión superficial? El método más directo consiste en cortar un cristal metálico de gran tamaño de forma tal que se obtenga el plano requerido, pulir y limpiar la superficie, enmascarar la mitad de ella y cubrir la otra mitad con átomos adsorbidos a una temperatura lo suficientemente baja como para impedir que los átomos salten. Al calentar la superficie, los átomos adsorbidos se difunden hacia la superficie desnuda. Mediante un experimento de este tipo, se puede determinar, al menos en principio, la velocidad de difusión, es decir, el cambio en la concentración de la sustancia adsorbida por la superficie en el transcurso del tiempo.

Aunque tales experimentos se han realizado en la práctica, son difíciles y tienen muchos inconvenientes. Incluso las superficies más perfectas desde el punto de vista macroscópico presentan huecos y otras imperfecciones susceptibles de afectar a la difusión. Por otra parte, el porcentaje de los lugares de adsorción ocupados por la sustancia adsorbida varía desde un cierto valor inicial en la mitad de la superficie cubierta del sustrato hasta un valor cero en la otra mitad. Dado que el coeficiente de difusión puede depender fuertemente de dicho porcentaje de cobertura, la interpretación de tales experimentos es muy compleja.

Hay otra dificultad más. Puesto que las superficies limpias son muy reactivas, los experimentos de difusión superficial deben llevarse a cabo bajo un vacío extremadamente elevado con el fin de evitar la contaminación de los átomos del gas residual existente en el aparato. Aunque se utilicen los mejores sistemas de vacío hoy a mano, las superficies se contaminan a los 10 o 100 minutos; en consecuencia, la duración de estos experimentos es limitada. Por ser baja la velocidad de difusión, resulta muy difícil medir el movimiento en un intervalo de tiempo tan corto.

A la vista de las consideraciones precedentes, concluimos que lo que se necesita es un método que permita estudiar la difusión superficial para distancias cortas en superficies monocristalinas libres de imperfecciones. Lo ideal sería abordar la difusión sobre una superficie con una cobertura de sustancia adsorbida constante o casi constante. La técnica experimental utilizada debería permitir también que dicha cobertura variase dentro de unos límites tan amplios como fuera posible.

Muchos de estos requisitos, aunque no todos, los cumple un instrumento conocido por microscopio de campo iónico, inventado por Erwin W. Müller en 1950. Este dispositivo permite resolver los átomos metálicos individuales adsorbidos sobre los planos de un cristal metálico microscópico; los planos están libres de defectos incluso a escala atómica. Gert Ehrlich, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Michael Bassett, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Londres, y Tien Tzou Tsong, de la Universidad estatal de Pennsylvania, han utilizado el microscopio de campo iónico para llevar a cabo ciertos trabajos, extremadamente detallados, acerca del movimiento de difusión de los átomos metálicos adsorbidos en sustratos metálicos. Desgraciadamente, con un instrumento de este tipo sólo se pueden observar las sustancias adsorbidas de carácter metálico; las sustancias tales como el hidrógeno, oxígeno o nitrógeno no forman imágenes en el microscopio de campo iónico. Sin embargo, existe otro dispositivo que sí permite estudiar la difusión de prácticamente cualquier clase de sustancia adsorbida. Este dispositivo se conoce con el nombre de microscopio de emisión de campo y fue inventado también por Müller en 1937. En muchos casos, los estudios de emisión de campo cumplen todas las especificaciones requeridas para la investigación de la difusión superficial.

El microscopio de emisión de campo no es un microscopio en el sentido convencional de la palabra. Su componente fundamental es una aguja muy puntiaguda cuyo extremo tiene una forma prácticamente hemisférica. Las trayectorias de los electrones emitidos por la punta de la aguja divergen en forma prácticamente radial. Si estos electrones se hacen llegar a una pantalla fluorescente, producirán una imagen muy aumentada de la superficie de dicha punta. El aumento de este instrumento

es aproximadamente igual a la distancia punta-pantalla dividida por el radio de la punta.

Se puede preparar una aguja emisora estirando un alambre delgado; una aguja de tungsteno u otro metal con un punto de fusión elevado se puede limpiar y pulir calentándola a temperatura elevada. Por este procedimiento se consigue que el radio de la punta de la aguja no llegue a los 1000 angstrom (el angstrom equivale a 10^{-10} metros). Utilizando esta aguja se puede obtener fácilmente un millón de aumentos.

Con estas agujas se podría obtener una ampliación todavía mayor utilizando una pantalla más grande y colocándola más lejos de la aguja, pero tales modificaciones no mejorarían la resolución del microscopio. Los electrones que emite la punta de la aguja no llegan a la pantalla siguiendo trayectorias perfectamente rectilíneas; estos electrones son emitidos con una componente de la velocidad al azar en un sentido perpendicular a la dirección de emisión y, por tanto, el lugar de origen de un electrón detectado sobre la pantalla sólo se puede determinar con una precisión de 20 o 30 angstrom.

Las imágenes producidas por el microscopio de emisión de campo (es decir, las imágenes con regiones iluminadas y oscuras que se obtienen en una pantalla fluorescente) constituyen un mapa de los electrones emitidos por la punta de la aguja. La emisión de campo tiene lugar como consecuencia de un fenómeno mecánico cuántico denominado efecto túnel. Los electrones se pueden mover libremente en un metal, pero, en general, están confinados dentro de sus límites: la energía potencial de un electrón aumenta considerablemente en la superficie del metal hasta alcanzar un valor "plateau" significativamente mayor que la energía que posee cualquiera de los electrones del interior del metal. Sin embargo, cuando la superficie del metal se coloca en un campo eléctrico intenso, la energía potencial en el exterior del metal disminuye a medida que nos alejamos de la superficie. Los electrones están todavía sometidos a una barrera de energía potencial en la superficie del metal, pero ahora dicha barrera posee una altura y una anchura mucho menores que las de antes. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, la posición de un electrón no se puede conocer con una precisión absoluta y, por tanto, existe alguna probabilidad de encontrar fuera de un metal a un electrón que originalmente estaba en su interior.

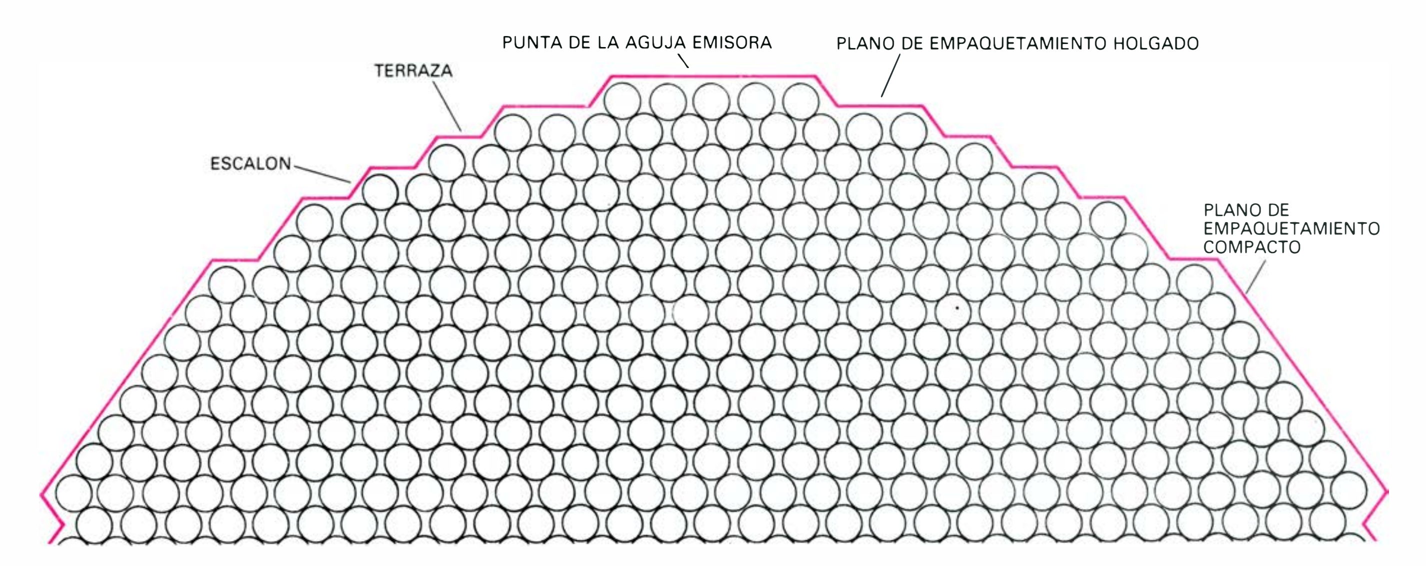
Para producir una emisión significativa de electrones se necesita un campo eléctrico intenso, del orden de 30 a 70 millones de volt por centímetro. El campo eléctrico producido por un objeto metálico cargado eléctricamente es máximo allí donde el radio de curvatura de la superficie metálica tiene un valor mínimo. De aquí se desprende que, si aplicamos una diferencia de potencial de unos pocos miles de volt entre la aguja y la pantalla fluorescente, en las proximidades de la punta de la aguja se obtienen campos eléctricos lo suficientemente intensos como para que se produzca una emisión de electrones.

La punta de la aguja a la que nos estamos refiriendo es mucho menor que un monocristal. En consecuencia, dicha punta es casi siempre parte de un cristal, incluso en el caso de que la aguja sea de alambre ordinario, constituido por muchos cristales. Aunque la punta tiene una forma aproximadamente semiesférica, presenta ciertas facetas planas que corresponden a los planos más estables del cristal. Las regiones que separan dichas facetas están formadas por una serie de terrazas y escalones; todos estos elementos corresponden al conjunto de los cortes que hay que dar al cristal para crear dicha configuración semiesférica.

La emisión de electrones es mínima para aquellos planos en los que los átomos del metal presentan un empaquetamiento compacto; se trata de los mismos planos estables que forman las facetas. La emisión es máxima para aquellas regiones en las que los átomos superficiales están empaquetados más holgadamente o, lo que es lo mismo, allí donde la superficie es más rugosa a nivel atómico. Por consiguiente, las variaciones espaciales de la intensidad en la pantalla fluorescente tienen la misma simetría que el cristal que constituye la punta emisora. Resulta así posible identificar las direcciones cristalográficas que corresponden a las diferentes zonas de la imagen obtenida en la pantalla. Sin embargo, la razón por la que el microscopio de emisión de campo resulta adecuado para estudiar la difusión superficial estriba en que la emisión de campo es sensible a la presencia de átomos adsorbidos.

El método más sencillo para estudiar la emisión superficial fue desarrollado, originalmente, en mi laboratorio de la Universidad de Chicago hace treinta años, y consistía en cubrir sólo un lado de una aguja emisora con un gas adsorbido. Ahora bien, si no se

EL MICROSCOPIO DE EMISION DE CAMPO, inventado por Erwin W. Müller en 1937, proyecta una imagen aumentada de la figura de emisión de electrones por parte de una aguja metálica. La emisión de campo está producida por un campo eléctrico intenso en la superficie de un metal. Al aplicar una diferencia de potencial entre la aguja y una pantalla fluorescente, la acusada curvatura de la punta de la aguja concentra las líneas de campo eléctrico y da lugar a una intensidad muy elevada en las proximidades de dicha punta. Los electrones que abandonan la punta por efecto túnel se mueven a lo largo de las líneas de dicho campo, en una trayectoria divergente en sentido radial. Por consiguiente, la imagen que se reproduce en la pantalla está muy ampliada. El aumento obtenido es aproximadamente igual a la relación entre el radio de la pantalla y el radio de la punta de la aguja. (El aumento no es exactamente igual a dicha relación en virtud de la influencia que introduce el resto del cuerpo de la aguja.) La resolución del instrumento es de unos 30 angstrom debido a que cuando un electrón abandona la punta de la aguja posee una pequeña componente de la velocidad al azar en un sentido perpendicular a la correspondiente línea radial. De aquí que el electrón pueda llegar a cualquier punto de la pantalla situado en un pequeño disco y, como consecuencia, la determinación de su origen en la punta estará afectada por un cierto error.



ESTRUCTURA ATOMICA de la superficie de la punta de una aguja. (Dicha punta es menor que un monocristal.) Consiste en una serie de planos y terrazas de forma semiesférica cuya sección transversal se representa aquí. El plano de la parte superior del hemisferio se une mediante una serie de escalones atómicos con un conjunto de terrazas de átomos cuya configuración superficial es la misma que la del plano superior. A medida que nos alejamos del extremo superior, las terrazas se hacen más estrechas y surgen nuevos planos, escalones y terrazas con configuraciones superficiales diferentes.

adoptan algunas precauciones, el gas procedente de la fuente colocada junto a la aguja cubre rápidamente toda la superficie: las moléculas que pasan junto a la aguja rebotan sobre las paredes del tubo de vidrio que encierra todo el aparato de emisión de campo y alcanzan finalmente el lado "oculto" de la aguja. Este rebote se puede evitar enfriando el tubo de emisión de campo en un baño de helio líquido a unos pocos grados por encima del cero absoluto. En estas condiciones, las moléculas que chocan contra las paredes del tubo son capturadas por el vidrio y tan sólo se forma un depósito sobre el lado de la aguja que se enfrenta a la fuente gaseosa. Por otra parte, dado que la presión de vapor de la mayoría de los gases a la temperatura del helio líquido es muy baja, la inmersión en helio líquido asegura la obtención de un vacío extremadamente bueno en el tubo de emisión, con lo que se evita la contaminación de la aguja. Este método recibe el nombre de sombreado.

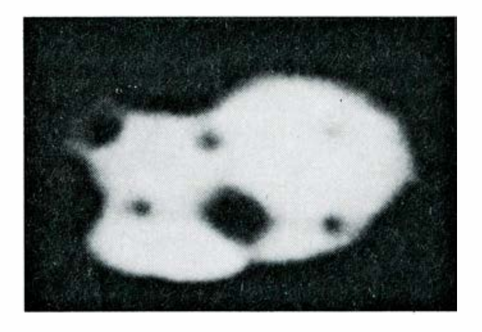
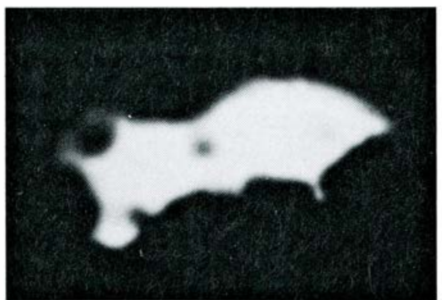
Al calentar la aguja, los átomos adsorbidos se difunden sobre su superficie y la figura de emisión resultante se altera. Debido al elevado aumento del sistema, a una velocidad de migración de algunos angstrom por segundo en la punta de la aguja corresponde una velocidad del orden de un milímetro por segundo en la pantalla fluorescente. Las figuras de difusión pueden fotografiarse o registrarse en una película para su estudio posterior.

Las figuras de difusión a que da lugar una aguja preparada en la forma que acabamos de exponer pueden proporcionar una información muy interesante; por otro lado, estas imágenes resultan extraordinariamente bellas. Por ejemplo, cuando se deposita más de una capa de moléculas de oxígeno (O_2) sobre uno de los lados de una aguja de tungsteno se aprecia el movimiento de un límite bien definido a lo largo de la agua incluso a temperaturas muy bajas, del orden de 25 grados Kelvin.

La explicación es simple. La primera capa de moléculas de oxígeno se disocia en la superficie y los átomos de oxígeno resultantes son adsorbidos; pero éstos no se ponen en movimiento hasta que se alcanzan los 400 o 500 grados Kelvin. Aunque una superficie de tungsteno sólo puede formar enlaces fuertes con una capa sencilla de átomos, si la temperatura es suficientemente baja, el oxígeno molecular se puede adsorber sobre los átomos quimiadsorbidos con anterioridad. Esta adsorción, débil, se conoce con el nombre de fisiadsorción; las moléculas de oxígeno fisiadsorbidas se difunden incluso a 25 grados Kelvin. Cuando estas moléculas alcanzan el límite de la capa quimiadsorbida, "descienden" de ella y se disocian en la superficie limpia de la aguja. Los átomos de oxígeno resultantes son quimiadsorbidos por dicha superficie, con lo que se produce una extensión paulatina de la capa quimiadsorbida y se hace posible una mayor difusión de la segunda capa. El límite al que nos referíamos anteriormente se puede observar a simple vista y corresponde al borde de la capa quimiadsorbida.

En general, la difusión no presenta un límite definido, ya que en todo movimiento aleatorio hay átomos que se mueven bastante adelantados respecto a otros. Sin embargo, en el caso de capas quimiadsorbidas o fisiadsorbidas sí que suele observarse una difusión con límites bien definidos. Si uno de los lados de la aguja de tungsteno se cubre con átomos de hidrógeno y el emisor se calienta entre 180 y 220 grados Kelvin, se pone de manifiesto la existencia de un límite bien definido avanzando en forma prácticamente radial a partir del plano compacto central. Cuando el límite ha penetrado hasta cierta distancia en el interior de las regiones más rugosas a escala atómica, se detiene. La magnitud de su avance depende del tamaño del depósito inicial; su movimiento se reanudará si se deposita más hidrógeno sobre la aguja.

Todos estos fenómenos síguense de las variaciones de la energía potencial de los átomos adsorbidos en las diferentes regiones de la superficie de tungsteno. Entre 180 y 220 grados Kelvin, los átomos de hidrógeno se pueden difundir con facilidad sólo en las facetas planas de la superficie de la aguja; los átomos resultan atrapados en las regiones más rugosas. Sin embargo, a medida que los pozos de energía que existen en las regiones rugosas de la superficie se saturan con átomos de hidrógeno, tales regiones se van suavizando artificialmente. En estas condiciones, la difusión de átomos de hidrógeno adicionales puede tener lugar con tanta facilidad en estas regiones como en las regiones intrínsecamente lisas.


DIFUSION DE MOLECULAS DE OXIGENO sobre una capa fuertemente ligada de átomos de oxígeno, adsorbidos sobre un cristal de tungsteno; se muestra en estas microfotografías tomadas con el microscopio de emisión de campo. La fotografía de la izquierda corresponde a un cristal de tungsteno limpio; el cuadrado oscuro del centro y los puntos oscuros que le rodean corresponden a otras tantas facetas del cristal con átomos empaquetados de forma compacta. En la fotografía del centro la mitad inferior del cristal se ha recubierto de oxígeno. El depósito de oxígeno consiste en una capa de átomos quimiadsorbidos (fuertemente enlazados) y en un exceso de oxígeno molecular; este último está adsorbido débilmente sobre la capa de átomos. Cuando el cristal se calienta a 25 o 30 grados Kelvin, las moléculas de oxígeno se mueven sobre la capa de átomos quimiadsorbidos. Cuando las moléculas llegan al límite de la capa descienden hasta la superficie del tungsteno y se disocian en sus átomos constituyentes, aumentando así la extensión de la capa quimiadsorbida. Sobre la capa quimiadsorbida recientemente formada se pueden mover nuevas moléculas de oxígeno que, a su vez, resultan también atrapadas en su límite. La microfotografía de la derecha muestra los límites de la capa de átomos quimiadsorbidos con un aumento de unos 145.000 diámetros.

Puesto que la suavización de regiones rugosas se produce por la precipitación de hidrógeno en los pozos de energía, se produce una discontinuidad entre la superficie libre de tungsteno y aquella parte de la superficie en la que todos los pozos se han llenado. Esta discontinuidad se va moviendo a medida que nuevos átomos de hidrógeno avanzan a lo largo de la superficie recién suavizada y, a su vez, resultan también atrapados. Cuando todo el hidrógeno disponible resulta atrapado en los pozos de energía, la difusión se detiene. Sin embargo, el avance se puede reanudar aumentando la temperatura de la aguja de forma tal que los átomos puedan saltar al azar de un hueco a otro.

Aunque el método de sombreado permite observar el fenómeno de la difusión superficial, no es capaz de proporcionar una estimación precisa del coeficiente de difusión sobre un monocristal plano cubierto uniformemente por una sustancia adsorbida. Sin embargo, el microscopio de emisión de campo se puede modificar para hacer posibles tales medidas. Esta modificación consiste, fundamentalmente, en practicar un pequeño agujero en la pantalla fluorescente. Con la ayuda de unos electrodos especiales se consigue dirigir a los electrones, emitidos por una región extremadamente pequeña de la superficie de la aguja, a través de dicho agujero. Procediendo de esta forma, se puede medir la emisión de electrones por parte de una región cuyo radio es tan sólo de 50 o 100 angstrom, tras proceder a una ampliación adecuada de la señal de electrones. Las dimensiones de esta región son lo suficientemente pequeñas como para estar incluida totalmente en una de las facetas mayores de la punta de la aguja emisora. Por otra parte, las facetas son lo bastante pequeñas para estar virtualmente libres de imperfecciones.

Si la aguja está cubierta uniformemente por una sustancia adsorbida y se calienta hasta que los átomos adsorbidos adquieran cierta movilidad, el número de átomos existentes en esa región fluctuará al azar dentro de un intervalo reducido. Debido a que la región en estudio es tan pequeña, las fluctuaciones resultan significativas y se producirán cambios medibles en la correspondiente corriente de emisión. El tiempo medio necesario para que se produzca una fluctuación, en un sentido creciente o decreciente, es igual al tiempo que invertirá un átomo en moverse desde el centro hasta el extremo de la región considerada; este tiempo se conoce como tiempo de relajación medio para una fluctuación. El valor de esta magnitud se determina midiendo las pequeñas fluctuaciones que se producen en la corriente de emisión, que procede de la región en cuestión, varios miles de veces. A partir de dicha magnitud, determinaremos el valor del coeficiente de difusión del plano en estudio para una determinada sustancia adsorbida y una determinada temperatura.

Habida cuenta que las fluctuaciones citadas anteriormente son al azar, la única información que pueden proporcionar está relacionada con sus propiedades medias. Para poner de manifiesto tales propiedades se utiliza la denominada función de autocorrelación temporal. Esta función proporciona una medida de la velocidad con que una fluctuación "olvida" las fluctuaciones precedentes; a partir de esta magnitud, se puede calcular el tiempo de relajación medio y el recorrido cuadrático medio de las fluctuaciones. Este procedimiento se conoce como método de las fluctuaciones.

El método de las fluctuaciones permite determinar los valores de los coeficientes de difusión bajo condiciones experimentales cuidadosamente controladas. Su principal inconveniente radica en el hecho de que las medidas de las fluctuaciones se deben llevar a cabo mientras la superficie de la punta de la aguja está sometida al campo eléctrico necesario para que tenga lugar la emisión. Ciertos átomos adsorbidos, así los de cesio y sodio, se polarizan fácilmente en presencia de un campo eléctrico intenso, es decir, su distribución de carga se altera significativamente. La polarización puede afectar tanto a la energía de adsorción de los átomos como a las alturas de las barreras de difusión y, por consiguiente, los correspondientes resultados no se pueden relacionar fácilmente con la difusión que tiene lugar en ausencia del citado campo eléctrico.

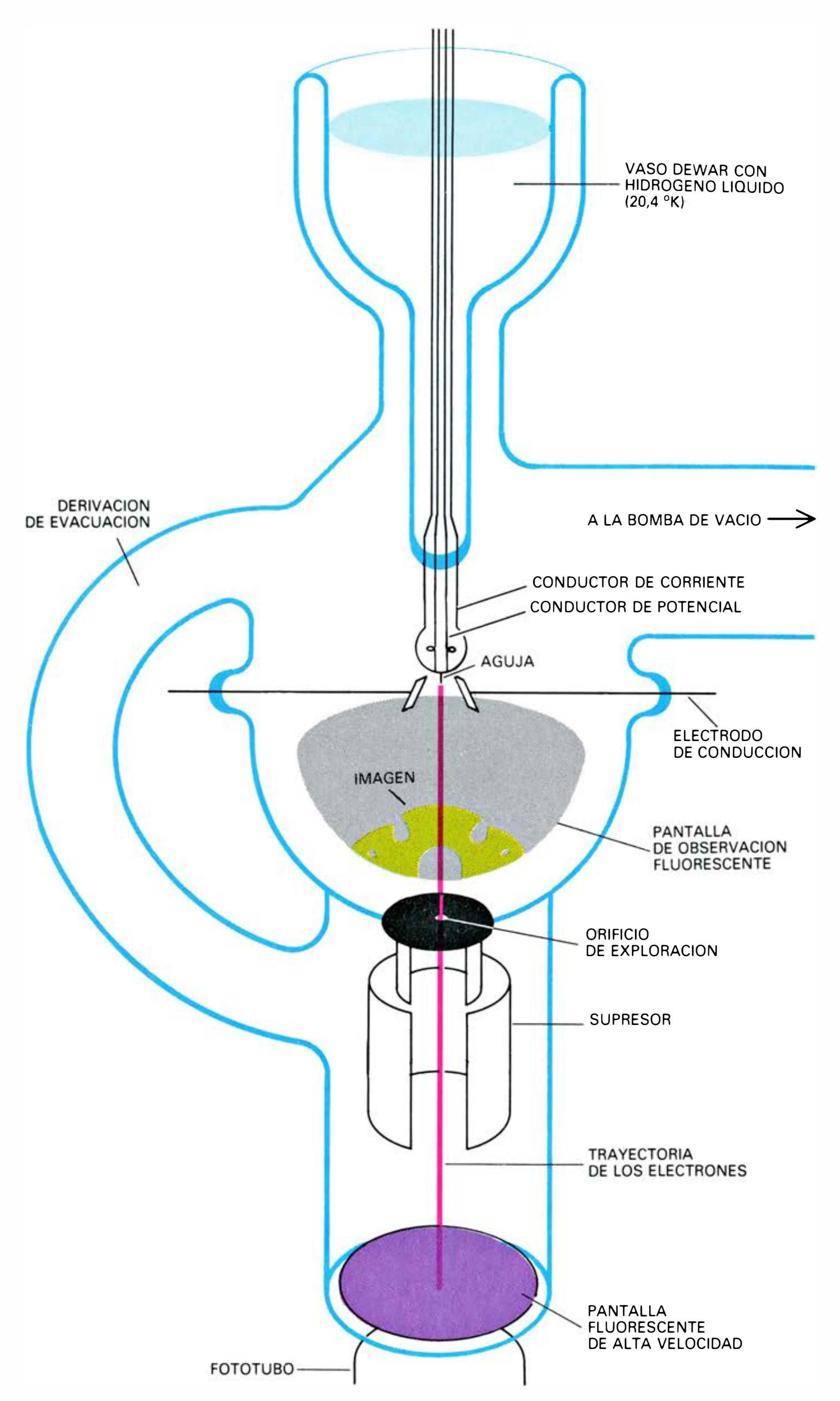
Otras sustancias adsorbidas se polarizan muy poco por la acción de los campos eléctricos; entre éstas citemos los átomos de hidrógeno y oxígeno y las moléculas de monóxido de carbono y otros gases. Los campos eléctricos no alteran significativamente los coeficientes de difusión de dichas sustancias. Este hecho me ha permitido investigar con gran detalle la forma en que el coeficiente de difusión varía con la temperatura y con la superficie cubierta por la sustancia adsorbida. Los resultados obtenidos en estos estudios ponen de manifiesto que dichos fenómenos son mucho más complejos que lo que se creyó en un principio.

El fenómeno más curioso que hemos investigado hasta ahora utilizando el método de las fluctuaciones es la difusión de hidrógeno y deuterio sobre el plano atómico de empaquetamiento más compacto del tungsteno, el así llamado plano (110). Estos sistemas han sido objeto de estudio por parte de mi colaborador Rocco Di-Foggio y por mí mismo a lo largo de estos tres últimos años.

Muchas veces resulta conveniente representar gráficamente la relación entre el coeficiente de difusión y la temperatura. El gráfico en cuestión es una línea recta siempre que la difusión corresponde a una escalada de la propia barrera por parte de los átomos adsorbidos al ser activados térmicamente. Esta gráfica se obtiene al representar el logaritmo del coeficiente de difusión en función del inverso de la temperatura absoluta. En otras palabras, el valor del coeficiente de difusión aumentará exponencialmente al disminuir el inverso de la temperatura, si la agitación térmica es la única causa de la difusión. (Debemos recordar que, de hecho, el coeficiente de difusión es una medida de la velocidad con que las partículas adsorbidas pasan de un pozo de energía a otro.) La pendiente de dicha línea recta es proporcional a la altura de la barrera de potencial. En el caso de hidrógeno atómico, y para temperaturas superiores al intervalo comprendido entre 110 y 170 grados Kelvin, el coeficiente varía con la temperatura según esa pauta.

Para temperaturas inferiores al intervalo comprendido entre 110 y 170 grados Kelvin, las gráficas presentan unos tramos horizontales. El coeficiente de difusión del hidrógeno atómico se mantiene prácticamente constante (es decir, independiente de la temperatura) para las temperaturas más bajas que hemos considerado en nuestro trabajo (30 grados). Inmediatamente sospechamos que el efecto túnel entre las barreras de energía empezaba a ser más importante que la escalada de dichas barreras.

El efecto túnel de un átomo de hidrógeno a través de una barrera de energía en una superficie es análogo al efecto túnel que tiene lugar cuando un electrón atraviesa la barrera de energía existente en la superficie de un metal al aplicar un campo eléctrico intenso. El efecto túnel, que es un fenómeno frecuente para los electrones, no lo es para los átomos y moléculas, por la sencilla razón de que la correspondiente probabilidad disminuye muy rápida-



MICROSCOPIO DE EMISION DE CAMPO MODIFICADO, esquemáticamente representado en esta figura. Este aparato permite determinar el coeficiente de difusión de una sustancia adsorbida sobre los planos individuales de un cristal. Unos electrodos de dirección se mueven sobre la pantalla de observación hasta que los electrones procedentes de una región del centro del plano en estudio atraviesan un orificio y llegan finalmente a una pantalla fluorescente. Allí, la corriente de electrones se convierte en luz susceptible de ser medida con un fotomultiplicador. La salida amplificada del fototubo es de nuevo una corriente eléctrica; las fluctuaciones de esta corriente corresponden a las fluctuaciones de la emisión de electrones en la región considerada. Las fluctuaciones de la emisión están producidas por el movimiento de los átomos adsorbidos hacia dentro y hacia fuera de dicha región. El coeficiente de difusión de los átomos adsorbidos en un plano del cristal se puede calcular a partir de la velocidad con que se producen las citadas fluctuaciones en la corriente de emisión. La aguja se enfría mediante unos cables huecos conductores de calor que la conectan térmicamente a un baño de hidrógeno líquido. La temperatura de la punta de la aguja se eleva induciendo una corriente eléctrica a través de una espira de tungsteno; esta temperatura se controla midiendo la resistencia eléctrica de la espira. El sistema se mantiene en un vacío ultraelevado.

mente al aumentar la masa de la partícula considerada. Sin embargo, en el caso de átomos relativamente ligeros, el hidrógeno por ejemplo, el efecto túnel (independiente de la temperatura) constituye una posibilidad importante, especialmente en el ámbito de la difusión superficial, donde las barreras de energía son pequeñas.

Para temperaturas relativamente elevadas la escalada es mucho más rápida que el efecto túnel y, por tanto, este último proceso no contribuye significativamente a la difusión superficial. Pero a medida que la temperatura disminuye y la escalada de la barrera se va haciendo menos probable, la importancia del efecto túnel aumenta y la contribución de la escalada de la barrera al proceso de difusión puede considerarse despreciable. Así es como la difusión puede llegar a ser independiente de la temperatura. Para comprobar esta hipótesis nos aprestamos a investigar la difusión del deuterio.

El deuterio es un isótopo del hidrógeno: su núcleo atómico está constituido por un protón y un neutrón y, por consiguiente, su masa es prácticamente el doble que la del hidrógeno ordinario, cuyo núcleo consta de sólo un protón. Sin embargo, desde el punto de vista químico, ambos isótopos son prácticamente idénticos. Por ser mayor la masa del deuterio, cabría esperar que, si la difusión independiente de la temperatura se debiera al efecto túnel, la difusión del deuterio sería independiente de la temperatura por debajo de cierto valor umbral, pero el correspondiente coeficiente de difusión sería significativamente menor que el del hidrógeno. Nuestros datos para el hidrógeno a bajas temperaturas confirman estas predicciones. La hipótesis del efecto túnel es correcta.

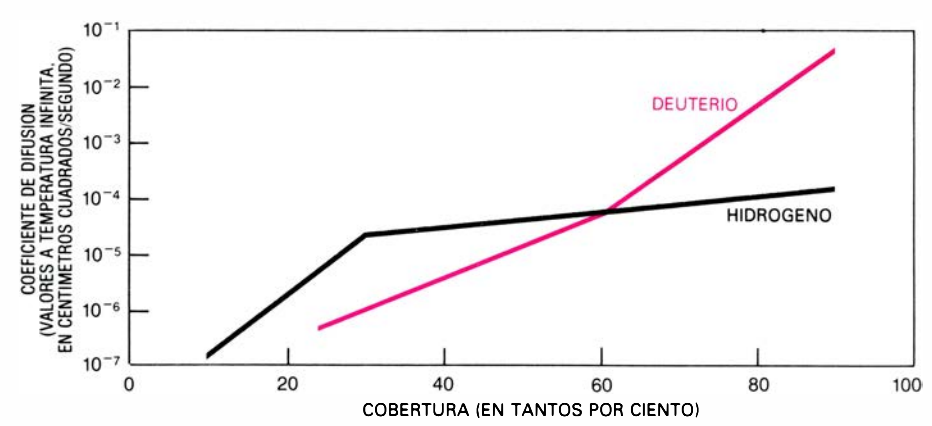
La demostración de que el efecto túnel de las partículas adsorbidas explica la difusión superficial para bajas temperaturas puede tener algún significado en astrofísica. Se supone que la formación de las moléculas de hidrógeno diatómico en el espacio tiene lugar sobre los granos de polvo interestelares y el efecto túnel de los átomos de hidrógeno sobre la superficie de estos granos de polvo a bajas temperaturas es uno de los mecanismos propuestos para dar cuenta de este hecho. Aunque tales granos no son de tungsteno, la probabilidad de que ocurra un efecto túnel de los átomos de hidrógeno en los granos interestelares resulta respaldada por nuestra observación de dicho efecto en el laboratorio.

Nuestros datos sobre los coeficientes de difusión del hidrógeno y deuterio sugieren que los efectos mecánico-cuánticos desempeñan un papel importante no sólo en el efecto túnel sino también en el proceso de difusión por escalada de las barreras. Por ejemplo, cabría esperar que para temperaturas en las que la escalada de las barreras es predominante, los coeficientes de difusión del hidrógeno y del deuterio deberían ser bastante similares. Nuestros datos indican lo contrario; la explicación de este hecho puede estar estrechamente relacionada con las grandes diferencias que existen entre el hidrógeno y el deuterio desde el punto de vista de la mecánica cuántica. Las pendientes de las gráficas de los coeficientes de difusión del hidrógeno y del deuterio son prácticamente iguales, de donde se deduce que las alturas de las barreras de ambos isótopos son idénticas. Sin embargo, en la mayoría de los casos, dichas curvas están desplazadas entre sí, lo cual supone que los correspondientes coeficientes de difusión sean bastante diferentes.

Supongamos que un átomo de hidrógeno o deuterio que haya superado una barrera de energía se encuentra con que el pozo de energía que existe al otro lado de la barrera está ya ocupado por otro átomo. En tal caso, es posible que el ocupante del pozo sea sacado de él y atraviese otra barrera de energía y, a su vez, produzca la difusión de un tercer átomo. La serie de difusiones sucesivas proseguirá hasta que uno de los átomos encuentre un pozo vacío.

Desde el punto de vista de la determinación de la longitud del salto, la serie de difusiones a la que acabamos de referirnos es indistinguible de un único salto muy largo realizado por la primera partícula adsorbida hasta ocupar el último pozo vacío de toda la serie. Dado que la magnitud del coeficiente de difusión varía con el cuadrado de la longitud del salto, resulta evidente que

COEFICIENTES DE DIFUSION del hidrógeno (*negro*) y del deuterio (*color*) para diferentes coberturas de la superficie compacta del tungsteno (110), representados en función de la temperatura. Intervalos iguales en el eje horizontal corresponden a valores iguales de los inversos de la temperatura, no a las temperaturas. Cuando se activa la difusión mediante energía térmica, permitiendo que los átomos adsorbidos salten sobre las barreras de energía, el logaritmo del coeficiente de difusión aumenta linealmente con el inverso de la temperatura. Esta gráfica pone de manifiesto que para temperaturas por encima de 110 a 170 grados Kelvin, y de acuerdo con el porcentaje de la superficie recubierta por los átomos adsorbidos, la activación térmica es la principal responsable de la difusión. Para temperaturas por debajo de dicho intervalo, el coeficiente de difusión varía poco con la temperatura. La difusión sobre superficies frías se presenta fundamentalmente a causa del efecto túnel, proceso independiente de la temperatura.



LAS DIFERENCIAS EN EL GRADO DE COBERTURA tienen efectos diferentes sobre el valor del coeficiente de difusión, según que la sustancia adsorbida sea hidrógeno ordinario (*negro*) o deuterio, isótopo del hidrógeno (*color*). Cuando la sustancia adsorbida cubre tan sólo una pequeña porción de la superficie disponible, el coeficiente de difusión para el deuterio es menor que para el hidrógeno, pero cuando la cobertura aumenta, el coeficiente de difusión del deuterio llega a superar al del hidrógeno. El valor especialmente alto del coeficiente de difusión del deuterio para coberturas elevadas se debe, probablemente, a la serie de procesos de difusión que tienen lugar cuando los átomos del deuterio se difunden a lo largo de la superficie. Cuando un átomo de deuterio salta a un lugar ya ocupado por otro átomo puede golpearlo con una fuerza suficiente como para extraerlo de ese lugar. A su vez, este segundo átomo puede desplazar a un tercero, y así sucesivamente, hasta que el último átomo de la cadena alcanza un lugar vacío. Esta serie de desplazamientos consecutivos equivale a un salto único de gran longitud dado por el primer átomo hasta el último lugar de la cadena; en consecuencia, la longitud media de los saltos resulta ser mucho mayor y el coeficiente de difusión aumenta. Debido a las restricciones que impone la mecánica cuántica, los átomos de hidrógeno no pueden aproximarse entre sí a distancias lo suficientemente pequeñas como para que se produzcan dichos desplazamientos en la mayoría de los encuentros, pero tales restricciones no se aplican en el caso de los átomos de deuterio, mucho más pesados que aquellos. En la presente figura se han representado los valores que tendrían los coeficientes de difusión si la temperatura fuera infinitamente elevada con el fin de eliminar los efectos de la correspondiente barrera de potencial.

la ocurrencia de una serie de difusiones de partículas hacia adelante puede contribuir a aumentar significativamente el valor del correspondiente coeficiente de difusión. Sin embargo, la probabilidad de que se produzca un número elevado de tales difusiones consecutivas depende de las propiedades cuánticas de las partículas que constituyen el sistema. Dado que los principios cuánticos impiden que los átomos de hidrógeno se aproximen entre sí hasta distancias lo suficientemente cortas como para que se produzca una difusión hacia adelante en la mayoría de los encuentros, la formación de cadenas de difusión largas resulta del todo imposible en este caso. Por el contrario, los átomos de deuterio son lo suficientemente pesados como para interaccionar de acuerdo con los principios de la mecánica clásica y no de la mecánica cuántica. En consecuencia, los átomos de deuterio sí se pueden aproximar entre sí a distancias lo suficientemente cortas como para que se originen cadenas de difusión largas. Este comportamiento puede explicar el hecho de que los coeficientes de difusión del deuterio son mayores que los del hidrógeno cuando la superficie base está densamente cubierta por estas sustancias. (Obsérvese que la ocurrencia de cadenas de difusión se verá favorecida cuando dicha cobertura sea muy densa.)

Aunque el hidrógeno es el átomo más sencillo y el mejor conocido, al estudiar su difusión sobre un plano liso con una estructura atómica relativamente simple se han puesto de manifiesto algunos fenómenos inesperados y extraordinariamente complejos. Estos hechos son una consecuencia de que el proceso de difusión superficial todavía no se conoce suficientemente bien. En el curso de estos últimos años, se ha ido obteniendo una información fiable en relación con los átomos quimiadsorbidos sobre superficies metálicas cristalinas, pero apenas se conoce nada acerca de la difusión en semiconductores, aislantes, metales amorfos o materiales orgánicos. No existen apenas datos cuantitativos sobre la difusión de mezclas de sustancias adsorbidas aunque dicha información es de gran importancia para la comprensión de la catálisis. Finalmente, están empezando a realizarse cálculos teóricos de coeficientes de difusión utilizando modelos que consideran de forma realista las interacciones entre dos sustancias adsorbidas y entre una sustancia adsorbida y el sustrato base; queda pendiente todavía una gran labor de investigación en relación con todas estas cuestiones. Los retos que se plantean, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, siguen a la espera de nuevas aportaciones.

Coevolución de mariposas y enredaderas

Las mariposas del género Heliconius *ponen sus huevos sobre la enredadera* Passiflora. *En su defensa, las plantas producen falsos huevos que confunden a las mariposas, haciéndoles creer que ya portan otros huevos en sus hojas*

Lawrence E. Gilbert

Compete a la ecología evolutiva investigar los detalles de las interacciones entre los organismos y analizar las consecuencias que se derivan. Entre las interacciones ecológicas, una de las más importantes, en términos de transferencia neta de energía en las redes alimentarias, quizá sea la que media entre plantas y animales. Este tipo de interacciones agrupa múltiples fenómenos ecológicos y afecta a la mayoría de las especies conocidas sobre la Tierra.

Existe hoy un generalizado interés por saber cómo, a lo largo de la evolución, se han ido influyendo en su acción recíproca pares de especies, una vegetal y animal la otra. Entre los ejemplos más conocidos de coevolución se cuentan las relaciones obligadas entre higueras y avispas y entre yucas y polillas. En ambos casos, las plantas necesitan los servicios de los insectos como transportadores del polen y éstos, a su vez, requieren de las plantas el sacrificio de algunos de sus óvulos para alimento de las larvas y que prospere así la reproducción de los insectos. Plantas y animales actúan aquí como agentes recíprocos de selección natural.

Pero no se piense que toda evolución sea mutualista. En muchos casos, uno de los organismos interactuantes parasita al otro. Una de las interacciones más prometedoras para el estudio de la coevolución animal-planta en casos de parasitismo es la que se da entre ciertas mariposas de colores vivos de los trópicos del Nuevo Mundo y ciertas enredaderas. Las mariposas pertenecen al género *Heliconius* y las enredaderas son pasionarias del género *Passiflora*. Estas han desarrollado defensas químicas muy eficaces contra los insectos, pero unos pocos, entre los que se cuentan las mariposas del género *Heliconius*, logran burlar la acción de dichas defensas. A su vez, esta capacidad les impide, aparentemente, parasitar otras plantas: las mariposas del género *Heliconius* depositan sus huevos únicamente sobre pasionarias, donde los huevos dan lugar a larvas que se alimentan vorazmente de las hojas de la enredadera. Lo más destacable es que algunas especies forman estructuras características cuya apariencia imita la de los conspicuos huevos de color amarillo intenso de las mariposas.

¿Qué explicación dar a este fenómeno de mimetismo, si es que en verdad se trata de mimetismo? Una posibilidad sería que *Passiflora* y *Heliconius* hubieran coevolucionado. Pero esta explicación resultará ambigua, sobre todo a quien esté familiarizado con la sucinta lista de especies de ácaros y hongos que atacan a una misma especie de roble o arce en las regiones templadas. ¿Cómo puede atribuirse causalmente un carácter de una planta a la selección natural impuesta por una sola especie o género de insecto de entre todos los que actúan sobre ella? Un efecto selectivo tal es prácticamente imposible. De ahí el interés de los vegetales que, como las pasionarias, tienen pocos parásitos muy especializados. Con sólo la acción de unos pocos herbívoros como los *Heliconius*, la aparición de caracteres defensivos en las pasionarias se justifica sin grandes ambigüedades. A ello contribuye también el que las mariposas del género *Heliconius* sean muy visibles, fáciles de estudiar en el campo y en cultivo y se cuenten entre los más importantes animales experimentales para la realización de investigaciones que van desde el comportamiento hasta la biología de poblaciones.

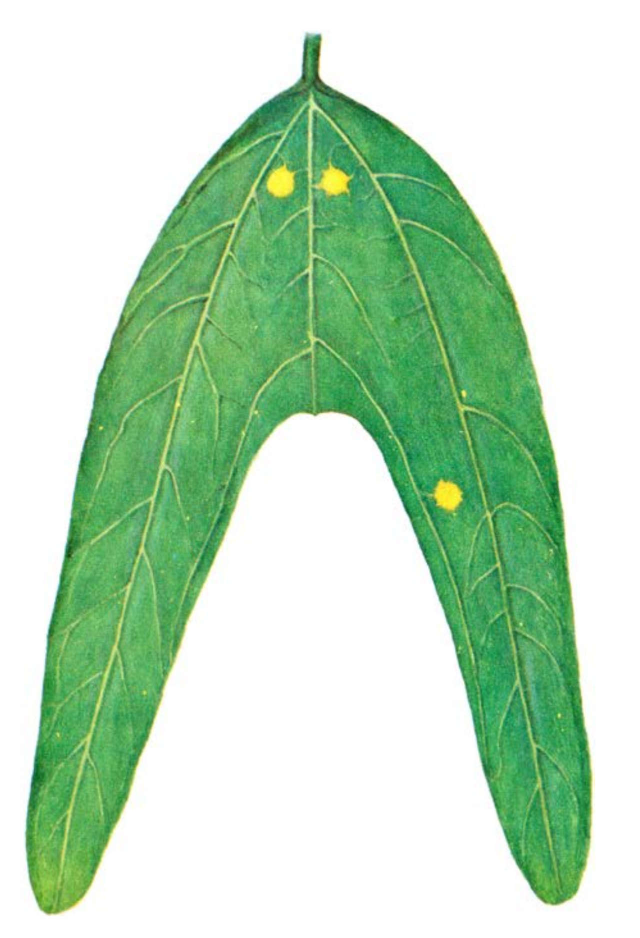
Hay otros aspectos del sistema *Passiflora-Heliconius* que lo convierten en objeto ideal para la manifestación y el estudio de la coevolución. La razón principal de que las interacciones entre las enredaderas y sus mariposas parásitas supongan un grave peligro para las plantas estriba en que las hojas, de las que depende su propia nutrición, son devoradas por las larvas; tal defoliación puede ser fatal. Nos hallamos ante un ejemplo de interacción coevolutiva muy intensa. Viene además a facilitar la tarea investigadora la extensa área geográfica donde se presenta la interacción básica; ello permite observar diferencias evolutivas divergentes entre plantas y animales.

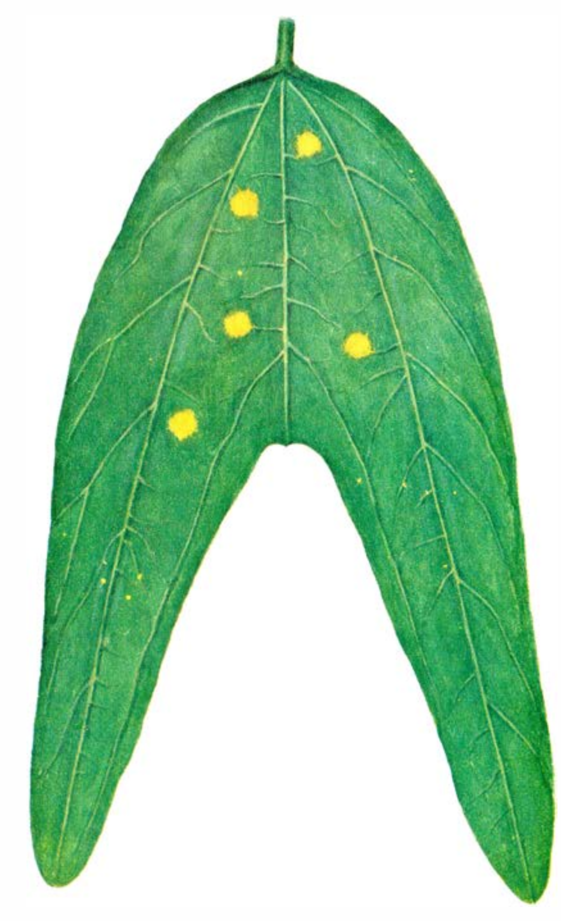
Hay unas quinientas especies de pasionaria en los trópicos del Nuevo Mundo. La mayoría sólo pueden ser identificadas por los botánicos que trabajan en los trópicos y por las mariposas cuyas larvas se alimentan de una sola especie de *Passiflora*. Por ejemplo, en Costa Rica, la especie *P. pittieri* es parasitada únicamente por la especie de *Heliconius H. hewitsoni*. La hembra deposita los huevos, de modo selectivo, sobre los brotes más tiernos de la enredadera. Las hembras de la especie *H. cydno*, por contra, depositan los huevos sobre varias especies de pasionarias. En otro aspecto, sin embargo, las hembras de *H. cydno* son más nocivas que las de *H. hewitsoni*; en cualquier pasionaria parasitada por *H. cydno*, la puesta se realiza sobre los brotes tiernos más próximos al suelo. Pero *H. cydno* ha ido muy lejos en su especialización: es incapaz de alimentarse de otra familia de plantas.

Las preferencias de puesta de este tipo limitan las oportunidades de las mariposas. El alcance de esta limitación se recoge en el estudio florístico de la isla de Barro Colorado, Panamá, recientemente terminado, tras diez años de trabajo, por Thomas B. Croat, del Jardín Botánico de Missouri. Croat determinó

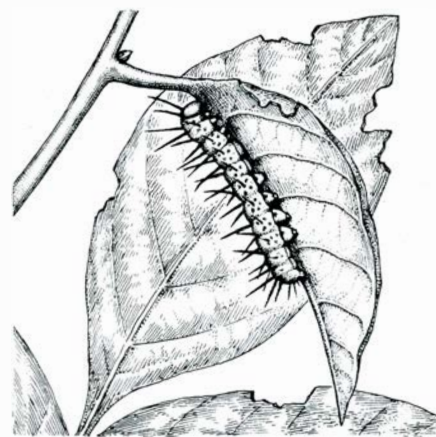


ESTRUCTURAS OVOMORFAS AMARILLAS en tres especies de *Passiflora* (pasionarias). Imitan los huevos amarillos que las mariposas del género *Heliconius* depositan sobre las enredaderas. Las larvas de mariposa que nacen de la puesta se alimentan vorazmente de las enredaderas. A la izquierda de la figura, un tallo de la especie de *Passiflora*, *P. cyanea*; las principales estructuras ovomórficas son las terminaciones de las estípulas: pares de apéndices foliformes. En el centro, un tallo de la especie *P. auriculata*; las principales estructuras modificadas en este caso son los nectarios del peciolo. A la derecha de la figura, un tallo de una especie indeterminada de pasionaria del nordeste del Perú; las estructuras modificadas son los nectarios situados en la inserción de la hoja y el peciolo. En esta especie, la expansión retrasada de las hojas con peciolo desarrollado oculta las zonas de crecimiento detrás de las hojas que presentan huevos miméticos. Las áreas de crecimiento son vulnerables a la acción trófica de las orugas que salen de los huevos verdaderos.





FALSOS HUEVOS DISTRIBUIDOS AL AZAR sobre dos hojas de la especie *P. candollei*. En esta especie, las estructuras ovomórficas son nectarios ligeramente prominentes. Los brotes parecen tener huevos distribuidos al azar alrededor de la zona de crecimiento, simulando brotes cargados de huevos.

HELICONIUS es un género de mariposas de los trópicos del Nuevo Mundo muy rico en especies. A la izquierda de la figura, una hembra de la especie *H. ismenius* poniendo un huevo sobre una enredadera de la especie *P. serratifolia*. A la derecha, una oruga de la especie *H. pachinus* sobre otra enredadera.

133 familias de plantas en la isla, representadas por un total de 1369 especies. De éstas, solamente 11 pertenecen a la familia de las pasionarias. Si se aceptan estas proporciones como expresión media para los trópicos del Nuevo Mundo, los *Heliconius* parásitos disponen, para la puesta, de menos del 1 por ciento de los vegetales de la región. Esta dispersión de los lugares de puesta se incrementa aún más debido a la preferencia de las mariposas por depositar los huevos sobre brotes frescos. La búsqueda de un lugar apropiado para la puesta constituye un problema nada fácil para la hembra, y le lleva su tiempo. Pero hay más.

La observación de campo revela que, aun después de encontrar una planta apropiada y, en ella, el brote joven idóneo, la hembra no siempre deposita un huevo. El lugar elegido no sólo debe ser apto para la puesta, sino que ha de reunir también las condiciones de seguridad y conveniencia necesarias para la progenie que emerja de los huevos. ¿Cuáles son los criterios de conveniencia y de seguridad? No se ve que exista competencia, por los lugares de puesta, con otros insectos no pertenecientes al género *Heliconius*; son contados los insectos que ponen sus huevos sobre la pasionaria. Algunos escarabajos y chinches lo hacen, pero carecen de la habilidad de las mariposas para dar con brotes frescos en enredaderas maduras o localizar jóvenes enredaderas dispersas.

¿Qué consecuencias produce, en la planta, el parasitismo del *Heliconius*? Depende mucho de la enredadera y del estrato que ocupe en el hábitat. La semilla de la pasionaria puede germinar sólo en suelos abiertos, expuestos a la luz del sol, o sea, donde la caída de un árbol o la erosión han producido un claro en el follaje que da sombra al suelo del bosque. La vegetación crece rápidamente hasta llenar el claro y, así, las plántulas de enredadera compiten en la ganancia de altura para permanecer a la luz del sol. Una sola oruga de *Heliconius* puede fácilmente consumir todas las hojas de una enredadera joven en el intervalo de tiempo que va de la eclosión del huevo a la entrada en estado de pupa. Una defoliación de este tipo quizá no mate a la enredadera, pero ciertamente frenará su velocidad de crecimiento en un momento crítico de su ciclo de vida. Si la planta queda así condenada a permanecer siempre en estado juvenil, no alcanzará nunca la madurez sexual ni producirá semillas.

Una enredadera madura que ha alcanzado la parte alta o media del estrato foliar del bosque raramente sufre defoliación total. La razón es que hay unas glándulas, situadas en diversas partes de la enredadera, pero no en las flores, que segregan un néctar "extrafloral" que atrae a hormigas depredadoras, avispas y moscas capaces de destruir a las orugas de *Heliconius*. Las hormigas del género *Ectatomma* pueden colonizar la base de una pasionaria grande y comer de ella durante meses, años incluso.

La presencia de tales "guardianes" no impide que las orugas de *Heliconius* dañen los nuevos brotes de enredadera antes de ser destruidas. Con John T. Longino, alumno mío, observé que el destino de los huevos y orugas de una pasionaria parasitada podía depender de cuál fuera la especie de hormiga que patrullaba por la enredadera. Algunas hormigas, incluidas las del género *Ectatomma*, se interesan fundamentalmente por el néctar segregado por la enredadera. Ignoran tanto huevos como orugas hasta que el daño ocasionado a un brote impide el desarrollo de una nueva rama.

Por tanto, si bien las orugas de *Heliconius* pueden negarle a las jóvenes pasionarias la madurez sexual, sus acciones pueden ser igualmente perjudiciales al impedir el crecimiento de nuevas ramas y flores de pasionaria maduras. Las plantas que no florecen y las inmaduras no producirán semillas. No hace falta que las pasionarias jóvenes y las maduras acaben totalmente defoliadas para que su éxito reproductor resulte afectado.

Estas observaciones, efectuadas en el campo y en invernadero, muestran como el parasitismo de *Heliconius* ejerce una presión selectiva suficiente para condicionar la evolución de las plantas huésped. En una población de pasionaria, una variedad genética aleatoria que tenga un peligro de infección menor, y cuyos caracteres restantes sean normales, presentará cierta ventaja reproductora frente a los individuos susceptibles. El individuo mutante contribuirá en mayor número a la población de plántulas que los individuos que sufren un riesgo mayor de ver reducida su producción de semillas. Tales gradientes de éxito debidos a las actividades de las mariposas pueden, con el tiempo, cambiar la estructura genética de las poblaciones y especies de plantas huésped.

Así las cosas, ¿qué caracteres conferirían a una enredadera menos susceptibilidad al parasitismo? Para responder a esta pregunta necesitamos conocer tres puntos de la interacción entre mariposas y enredaderas: el primero es el modo como la hembra de la mariposa encuentra una planta huésped. El segundo tiene que ver con la decisión tomada de depositar o no los huevos. El tercer punto trata de los factores que afectan a la supervivencia de huevos y larvas en la enredadera. La selección resultante del parasitismo de *Heliconius* favorecería, obviamente, a una enredadera mutante que fuera más difícil de localizar por la mariposa, que resultara menos idónea para la puesta, una vez encontrada, y que se tornara inhóspita para la descendencia de la mariposa. (Por supuesto, a medida que la pasionaria evolucionara bajo estas tres presiones, la selección favorecería también a una mariposa mutante capaz de encontrar más fácilmente a una pasionaria. Pese a lo cual, no vamos a detenernos ahora en esta componente coevolutiva.)

Veamos el primer aspecto de la interacción. ¿Cómo da la mariposa hembra con una enredadera huésped apropiada? Experimentos de laborato-

rio, llevados a cabo por Newton H. Copp y Demorest Davenport, de la Universidad de Santa Bárbara, han demostrado que, cuando se dirige una corriente de aire sobre hojas de pasionaria, se lleva consigo ciertas sustancias volátiles que provocan respuestas en ciertas mariposas relacionadas con el género *Heliconius*. En la naturaleza, este tipo de orientación por el olor serviría sólo para llevar a una mariposa buscadora hasta los alrededores de una enredadera, perdida entre cientos de plantas del bosque. Una localización más precisa requeriría un contacto directo con la superficie de la hoja. Las mariposas del género *Heliconius*, como otros miembros de su familia (*Nymphalidae*), tienen a dicho efecto un par de patas frontales modificadas con las que tamborilean en la superficie de la hoja. Este método de muestreo directo en la superficie de la hoja es, evidentemente, lo que permite a la mariposa reconocer la planta huésped apropiada.

Incluso antes de esta aquilatación química, la hembra responde a estímulos de otro carácter: las percepciones visuales. Estos aspectos de la selección del huésped son complejos. En mi laboratorio de la Universidad de Texas en Austin, Thomas Abrams demostró que hembras jóvenes sin experiencia previa se sentían fuertemente atraídas por modelos de zarcillos de pasionaria hechos en alambre. Esta conducta sugiere que las especies de *Heliconius*, por lo menos algunas de ellas, dividen a las plantas, de modo instintivo, en dos categorías visuales: plantas con zarcillos y plantas sin zarcillos.

Observaciones de campo e invernadero, llevadas a cabo con hembras adultas, indican que éstas responden también a estímulos visuales más sutiles. Por ejemplo, he visto repetidas veces hembras de *Heliconius* que se acercan a, y reconocen, plantas que recuerdan en su apariencia general y en la forma de la hoja a su planta huésped particular. Este hecho sugiere que, con la experiencia, las mariposas pasan de rastrear indiscriminadamente cualquier hoja a rastrear sólo las hojas de apariencia semejante a las del huésped deseado. A veces, en cultivos de invernadero, depositan los huevos en hojas de plantas no comestibles que se asemejan a las enredaderas.

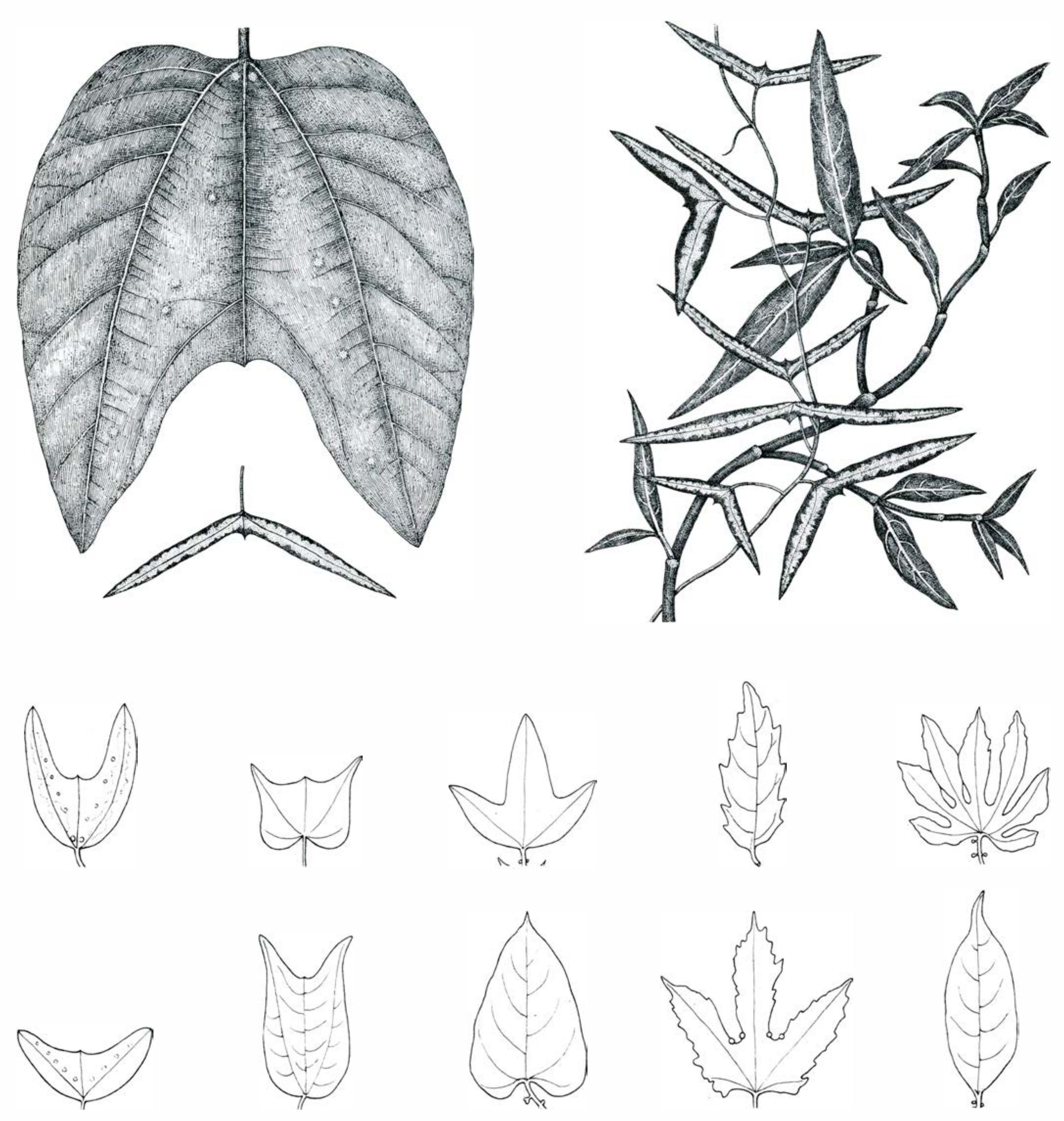
No se ha efectuado aún con *Heliconius* una investigación experimental adecuada de esta posibilidad de búsqueda a partir de imágenes aprendidas. Marc D. Rausher, de la Universidad de Duke, ha estudiado un comportamiento similar de la mariposa *Battus philenor*, que deposita sus huevos tan sólo sobre plantas de la familia de las *Aristolochiaceas*, específicamente sobre el género *Aristolochia*. En trabajos de campo realizados en el este de Texas, Rausher comprobó que las hembras de *Battus*, cuando buscan lugares adecuados para la puesta, no sólo se aproximan a hojas de *Aristolochia*, sino también a todas las hojas similares a las de aquella especie de *Aristolochia* con la que las mariposas han mantenido un contacto mayor durante una determinada fase de la estación de vuelo.

La posibilidad de que el reconocimiento de la forma de la hoja fuera importante en la búsqueda de las plantas huésped, combinada con la posibilidad de que tal reconocimiento redujera el potencial reproductor de la planta, me llevó a proponer los tres elementos de la morfología de las hojas de pasionaria que podían haberse desarrollado bajo la presión del parasitismo de las mariposas del género *Heliconius*. El primer elemento, avalado por los resultados de investigaciones de campo, es el de la semejanza: en muchos hábitat, las hojas de pasionaria se parecen en forma y textura a las hojas de ciertas plantas no huéspedes que crecen abundantemente en el mismo lugar que las pasionarias. Mis colegas y yo hemos detectado semejanzas entre las hojas de una especie particular de *Passiflora* y las que coexisten con ella, pertenecientes a los géneros *Philodendron* o *Rubus*. En otros hábitat, una especie de *Passiflora* tiene las características foliares de otras plantas. Un ejemplo lo constituye la lanceolada y coriácea hoja de *P. ambigua* y la de muchos árboles y arbustos de la pluvisilva madura.

El segundo elemento se avala también por observaciones de campo. En numerosas áreas donde coexisten distintas especies de pasionaria, las diferencias entre las hojas abarcan un rango sorprendentemente amplio. El tercer elemento, también apoyado por observaciones de campo, es el gran cambio de la forma foliar que presentan muchas especies al pasar de la fase de plántula a la de planta madura. Además, las hojas de las plántulas de la enredadera se asemejan a las de otras plántulas del sotobosque, mientras que las de plantas maduras guardan un parecido mayor con las de las plantas de la cubierta del bosque. Este fenómeno sugiere que la presión del parasitismo de *Heliconius* ha favorecido la evolución de hojas que confunden a la hembra de la mariposa en el momento de la puesta. Las pruebas en favor de dicha hipótesis son circunstanciales y de tipo comparativo.

Entre las interacciones insecto-planta que he examinado con el propósito de dilucidar el papel desempeñado por la forma de la hoja se cuenta la de la especie de *Heliconius H. hewitsoni* y su huésped, la especie de *Passiflora P. pittieri*. Esta mariposa deposita sus huevos en grupos, y no de forma aislada. Observando hembras marcadas, comprobé que, después de depositar sus huevos sobre una planta, la hembra volvía a ella varias veces al día. Algunas de las mariposas marcadas repartían su tiempo entre una zona de 0,2 hectáreas de superficie en la que había cuatro plantas huésped y una zona de cucurbitáceas, distante 150 metros, donde podían alimentarse de polen y néctar.

Recogí tallos de *P. pittieri* con brotes nuevos desarrollados y los coloqué en la zona con enredaderas visitada con



VARIABILIDAD DE LA FORMA DE LA HOJA: característica de las enredaderas del género *Passiflora* desarrollada, se supone, bajo la presión selectiva del parasitismo ejercido por el género *Heliconius*. En algunas especies de pasionaria, la apariencia de la hoja madura (*arriba*) difiere mucho de la configuración de la hoja juvenil (*hoja situada debajo de la superior izquierda*); las hojas pertenecen a *P. cuneata*. Algunas enredaderas quedan mejor protegidas del parasitismo de *Heliconius* al poseer hojas cuya configuración se parece a la de plantas que no actúan de huéspedes en este estadio de crecimiento de la pasionaria. Por ejemplo, las hojas juveniles de la especie *P. cuneata* (*arriba, a la derecha*) se parecen generalmente a las de plantas no huéspedes, comunes en los claros donde crecen las pasionarias juveniles; se muestran aquí las hojas de una planta no huésped mezcladas con hojas de *P. cuneata*. Una hembra en período de puesta que selecciona las plantas huésped por la forma de sus hojas quizá pase por alto esas hojas de pasionaria. Las hojas situadas en fila en la parte inferior y media ilustran la variabilidad de hojas en dos áreas: Trinidad (*centro*) y Costa Rica (*abajo*). Las dos hojas de cada par vertical muestran la variabilidad en especies afines. De izquierda a derecha: *P. tuberosa* (*arriba*), *P. biflora* (*abajo*), *P. capsularis* (*arriba*), *P. costaricensis* (*abajo*), *P. cynaea* (*arriba*), *P. oerstedii* (*abajo*), *P. quadrangularis* (*arriba*), *P. vitifolia* (*abajo*), *P. serrato-digitata* (*arriba*) y *P. ambigua* (*abajo*).

regularidad. Las hembras no estudiaban los lugares de puesta potencial que les había suministrado. Situé además formas abstractas detrás de los puntos de puesta y esparcidas por la superficie de distribución de las pasionarias; las hembras no se acercaban a ninguna de ellas. Aparentemente, las mariposas habían entrado en un estado secundario de comportamiento de búsqueda, en el que empleaban todo su tiempo en la reinvestigación de una planta huésped ya descubierta anteriormente. ¡Si las formas abstractas emplazadas por mí tuvieron alguna influencia en el comportamiento de las mariposas, ésta fue dar pistas de dónde no poner huevos adicionales! ¿Cómo se ha desarrollado un tal patrón de dos estados de búsqueda? Evidentemente, resulta del patrón de crecimiento de las enredaderas y de las consiguientes tácticas de puesta de *H. hewitsoni*.

La enredadera *P. pittieri* produce nuevos brotes muy de tiempo en tiempo, de ahí que la pauta de búsqueda de la hembra de *H. hewitsoni*, según se ha visto, comprenda dos fases de comportamiento igualmente críticas. La primera de ellas puede denominarse fase de descubrimiento; la joven e inexperta mariposa busca plantas con la composición química foliar apropiada. En esta fase, la planta inspeccionada puede tener o no lugares adecuados para la puesta.

La segunda fase puede llamarse de decisión: ¿En qué momento justo debe la hembra efectuar la puesta sobre una hoja de una planta huésped que ha descubierto y visitado regularmente con anterioridad? Si los huevos se depositan demasiado pronto, las orugas pueden devorar el brote antes de que aparezcan las hojas, porque son demasiado pequeñas para comer las hojas viejas y duras; en tal eventualidad morirían de hambre. Si la puesta se hace demasiado tarde, la oruga puede encontrarse con que las hojas, de rápido crecimiento, son ya demasiado duras; las consecuencias son igualmente fatales. Puesto que la hembra de *H. hewitsoni*, en virtud de su evolución, deposita sus huevos sólo sobre una especie de planta huésped (y tal vez también porque la planta huésped es relativamente grande y por ello fácil de localizar), no parece que estas mariposas se hayan especializado en dedicar todo su esfuerzo a buscar nuevas plantas huésped, sino en seleccionar el momento adecuado de puesta sobre plantas huésped descubiertas anteriormente. Por tanto, para localizar plantas huésped, esta especie tiende a sacar partido de estímulos más generales que la mera forma de la hoja.

El comportamiento de las hembras de *H. hewitsoni* contrasta con el de las hembras de *H. cydno*. Estas, que ponen huevos sueltos en número de seis a diez por día sobre cualquier variedad de la especie de *Passiflora* que esté a su alcance, seleccionan frecuentemente enredaderas huésped demasiado pequeñas para la puesta de huevos en grupo e insuficientes para alimentar un gran número de orugas. Con casi diez huevos por día, las hembras de *H. cydno* están obligadas a una continua búsqueda de nuevos huéspedes en un hábitat forestal donde la densidad de pasionarias es baja. Las mariposas han desarrollado un modelo de comportamiento que depende probablemente del reconocimiento visual de formas foliares similares a las de plantas huésped encontradas con anterioridad. El vasto número de especies explotadas y la gran eficacia del reconocimiento visual, como alternativa a la prospección al azar, significan que a lo largo del día las hembras tantearán muchos lugares de oviposición entre los que elegir.

El corolario inmediato es que si una pasionaria está parasitada por una especie de mariposa cuya estrategia principal de reconocimiento es la forma de la hoja, la especie víctima estará sometida a una fuerte presión selectiva que la hará evolucionar a la vez en dos direcciones: (1) convergencia con plantas distintas de *Passiflora* y (2) divergencia de plantas de otras especies de *Passiflora* que puedan servir de alimento a orugas. (Si las hojas de un vegetal coinciden en la forma con las de otra planta, puede atraer a visitantes indeseables. Esta conclusión corrobora la hipótesis mencionada anteriormente, y se apoya en la variedad de formas foliares observadas entre las especies de comunidades locales ricas en especies de *Passiflora* que están expuestas a los mismos insectos buscadores.)

Abordamos ahora el segundo aspecto de la interacción entre mariposas del género *Heliconius* y enredaderas *Passiflora*. Tras la selección de un lugar adecuado para la puesta, la mariposa debe decidir entre poner un huevo (o más), o seguir buscando. El criterio para tomar tal decisión es muy importante para el éxito del parásito; pero sólo disponemos de unos pocos datos sobre su naturaleza. Parece razonable suponer, por ejemplo, que un posible criterio pudiera ser la presencia o ausencia de depredadores o competidores en el sitio elegido.

En efecto, muchas larvas de las especies de *Heliconius* que ponen un solo huevo presentan canibalismo. Se puede suponer, por tanto, que un criterio de peso a la hora de realizar o no la puesta sea la presencia o ausencia de huevos de otras hembras en el lugar seleccionado. Un mecanismo que permitiera evitar tales lugares evolucionaría fácilmente, ya que las mariposas mutantes tendrían más descendientes que las mariposas que pusieran los huevos al azar en sitios ocupados y desocupados.

¿Se ha desarrollado realmente ese comportamiento de evitación? La respuesta es afirmativa; se ha comprobado que las especies de *Heliconius* que ponen huevos sueltos no los depositan al azar. Los estudios de campo demuestran que los brotes de plantas que sostienen un solo huevo son más numerosos que los que llevan dos o más, en una proporción mucho mayor que lo que el azar prevería estadísticamente. Este modelo de comportamiento, técnicamente denominado "estimación de la carga de huevos", goza de una documentada exploración, no sólo entre las especies de *Heliconius*, sino también entre otros insectos, incluidas otras familias de mariposas.

Dando por cierta la existencia de ese comportamiento, ¿cuál sería el estímulo que conduce a él? Al menos en lo que respecta a las especies de *Heliconius*, destaca un estímulo potencial por encima de los demás: los huevos se depositan en lugares conspicuos, como la punta de un brote, y son de color amarillo vivo. Hasta hace poco, la posibilidad de que el estímulo cromático desempeñara alguna función en la inhibición de la puesta se apoyaba únicamente en pruebas circunstanciales.

Estímulos aparte, ¿cómo puede influir este mecanismo de estimación del volumen de puesta en el modelo de interacción coevolutiva entre mariposas y pasionarias? Para contestar a la pregunta debemos acudir a la historia reciente: a finales de la década de los sesenta, W. W. Benson (actualmente en la Universidad de São Paulo) y yo, trabajábamos en distintos lugares de los trópicos del Nuevo Mundo y llegamos a una misma conclusión. Apreciamos que algunas pasionarias (especies distintas en nuestras respectivas áreas de trabajo) poseían marcas amarillas. Nuestra hipótesis, a la que llegamos independientemente, proponía que estas marcas, idénticas en el color y a veces en la forma a los huevos de *Heliconius*, reducían la probabilidad de que se depositara un huevo en la planta. La razón, por supuesto, residiría en la pre-

sunta existencia de huevos previamente depositados en las hojas.

Esta hipótesis me atraía especialmente, porque son pocos los desarrollos evolutivos del reino vegetal que pueden atribuirse a presiones de selección ejercidas por agentes bien identificables. En los años que siguieron, estudios comparativos de lo que empezamos a llamar "ovomimetismo" en varias especies de *Passiflora* ofrecieron un fuerte apoyo a esta hipótesis. Aunque las características ovomiméticas se han hallado sólo en un 2 por ciento de las 500 especies de *Passiflora* del Nuevo Mundo, su aparición se produce por vías demasiado distintas para correlacionarlas con una sola función botánica. Parecen también haber evolucionado de manera esporádica en las distintas líneas de *Passiflora*, presentándose en unas y no en otras poblaciones de especies y subgéneros de *Passiflora*. Este modelo indica que el mimetismo de los huevos es un carácter de desarrollo reciente, que se da desde la importante radiación de pasionarias en el Nuevo Mundo.

En 1976, Kathy S. Williams, una estudiante de mi laboratorio, y yo mismo nos propusimos comprobar experimentalmente si las mariposas del género *Heliconius* eran verdaderamente los agentes selectivos responsables del desarrollo de los huevos miméticos sobre las *Passiflora*. Aislamos hembras de *H. cydno* en un invernadero donde podían alimentarse, pero carecían de pasionarias para la puesta de huevos. En nuestro primer experimento introdujimos cuatro brotes de *P. oerstedii*, dos de ellos llevaban un huevo de *Heliconius* bien visible, mientras que los otros dos no llevaban ninguno. Registramos entonces el número de veces que las hembras visitaban los brotes. Hubo puesta en el 70 por ciento de las visitas a los brotes libres y tan sólo en el 30 por ciento de las visitas a los brotes con huevos. Estos resultados apoyaban sólidamente la estimación de la carga de huevos, pero no excluían la posibilidad de que fuera el estímulo olfativo y no el visual el responsable de advertir si el brote estaba o no ocupado.

Para comprobar la capacidad de discriminación del color por parte de las mariposas repetimos el experimento, permitiendo, esta vez, la elección entre brotes desocupados, brotes con huevos amarillos y brotes con huevos teñidos de verde. (Los huevos de ambos colores se aclararon con agua destilada para eliminar toda posibilidad de que la tinción hubiera eliminado algún repelente químico.) Las mariposas depositaron el mismo porcentaje de huevos por visita en los brotes desocupados que en los brotes con huevos verdes, mientras que en los brotes con huevos amarillos aclarados la proporción era significativamente inferior: menos del 5 por ciento, comparado con el 25 por ciento correspondiente a los brotes desocupados o con huevos verdes. Los resultados demostraron que, para las mariposas, el principal estímulo para detectar la presencia de un huevo era su color natural.

Nuestro tercer experimento pretendía comprobar la hipótesis de que, si bien en algunas circunstancias las mariposas depositan sus huevos en brotes ocupados, existe cierta inhibición residual en contra de dicho comportamiento. El experimento fue muy simple; se presentó a hembras aisladas de *H. cydno*, primero, brotes de *Passiflora* sin huevos y, luego, brotes con huevos. En los brotes con huevos, la puesta tardó más del doble que en los brotes desocupados: 22 segundos en los primeros y tan sólo 10 en estos últimos. La diferencia de 12 segundos sirvió para dar con un lugar, en el brote portador de huevos, situado a cierta distancia del lugar ya utilizado. Este tipo de discriminación quizá sea raro en la naturaleza y puede atribuirse a las condiciones de superpoblación del invernadero. Sin embargo, la existencia de una conducta de búsqueda lenta para la localización de lugares secundarios en los brotes ocupados sugiere que la superpoblación de los brotes ha sido un factor de evolución en el comportamiento de puesta en *H. cydno*.

Williams y yo proyectamos nuevos experimentos para comprobar con qué eficacia los huevos miméticos evitaban la puesta de nuevos huevos. Trabajamos con la especie *P. cyanea*, que desarrolla en sus estípulas abultamientos amarillos muy conspicuos: expansiones foliosas pares en los tallos de la planta. Cuando a las hembras de *H. cydno* se les daba a elegir entre brotes con huevos miméticos y brotes sin ellos, la preferencia por estos últimos fue significativa: un 40 por ciento frente a un 25 por ciento. Es más, el tiempo medio transcurrido hasta que la mariposa depositaba un huevo en un brote con un huevo mimético era casi igual que el que se midió anteriormente para la puesta sobre brotes con huevos reales de *Heliconius*. Lo que esto sugiere es que los huevos miméticos no detienen totalmente la puesta de nuevos huevos, pero obligan a las mariposas a buscar lu-

DISCRIMINACION DEL COLOR por hembras de *Heliconius*; se demostró en una serie de experimentos con pasionarias. Cuando a las hembras de *H. cydno* se les da a elegir entre (*a*) una enredadera sin huevos (*barra gris*) y una con huevos (*barra de color*), en un total de 217 ensayos, las mariposas seleccionaron lugares libres de huevos el 70 por ciento de las veces. Para determinar si era el color o un estímulo químico el que gobernaba este comportamiento de las mariposas se les dio a elegir entre (*b*) una enredadera sin huevos (*barra gris*) y una enredadera que llevaba un huevo teñido de verde (*barra de color*). Sobre un total de 80 ensayos, las mariposas no mostraron preferencia por el lugar libre de huevos. Por último, se les ofreció (*c*) una enredadera con un huevo verde (*barra gris*) y otra con un huevo amarillo normal (*barra de color*). De un total de 66 inspecciones, las mariposas seleccionaron el lugar con el huevo verde en más del 30 por ciento de los casos y el lugar con huevos amarillos en menos del 5 por ciento. Donde los porcentajes expresados en las barras no suman 100, el resto corresponde a inspecciones en las que no hubo puesta.

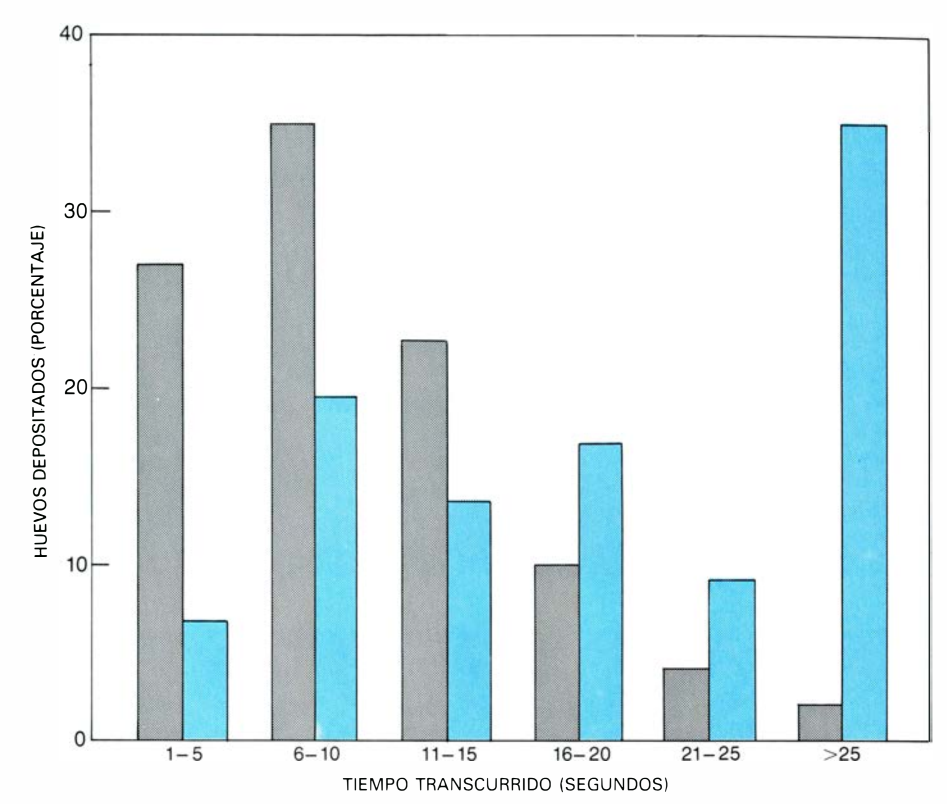
gares de puesta secundarios, a cierta distancia de la zona apical del brote, reduciendo, al menos, el número de huevos depositados en ese punto vulnerable.

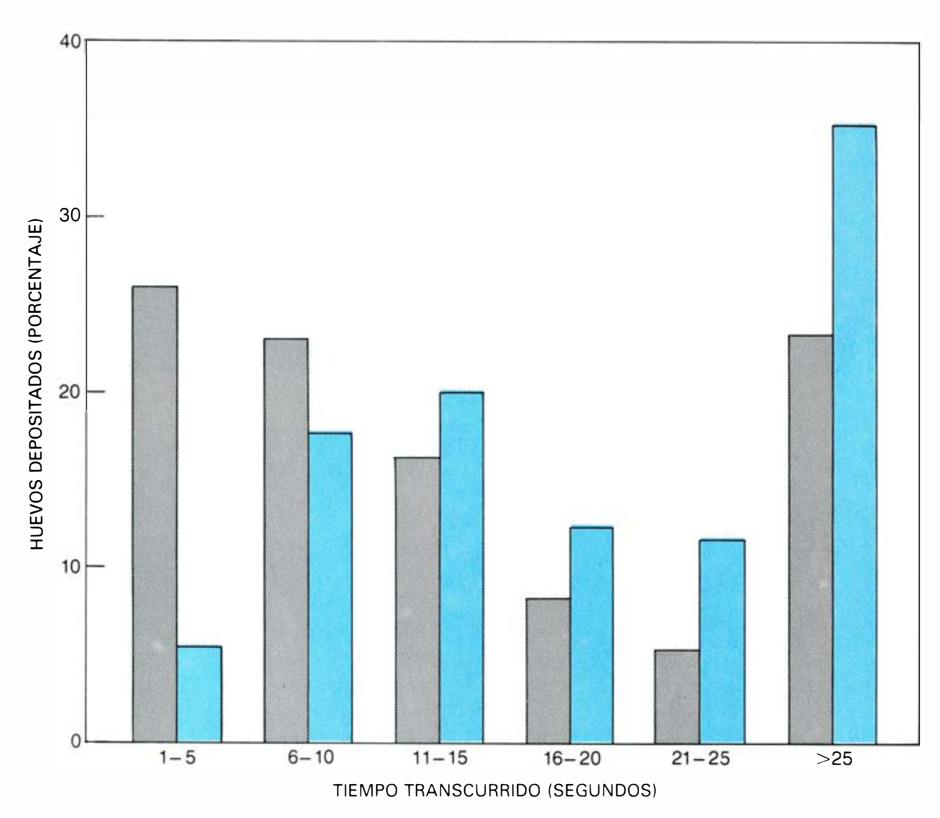
Algunos tipos de crecimiento y desarrollo son únicos de las especies de *Passiflora* que forman huevos miméticos. Por ejemplo, en las pasionarias del grupo llamado *Decaloba*, así *P. biflora*, el crecimiento de los brotes es paralelo al desarrollo de las hojas. Pero hay una especie de este grupo, hallada en el noroeste del Perú, que se aparta de esa regla: posee huevos miméticos. Las estructuras modificadas son glándulas nectaríferas de sus hojas. En esta especie, el crecimiento y desarrollo de las hojas es normal, pero el crecimiento interno del tallo, entre los puntos de divergencia de hojas y otros órganos, se realiza a pulsos. El resultado es que la yema terminal del brote está siempre "protegida" por un prominente despliegue de huevos miméticos.

Algunas poblaciones de la especie *P. auriculata* llevan huevos miméticos; otras, no. En las que los poseen, las estructuras modificadas son los nectarios del peciolo, que se desarrollan precozmente, alcanzando las dimensiones adultas cuando la hoja está todavía muy tierna. De esta forma, el ápice parece estar cubierto de grandes huevos dorados.

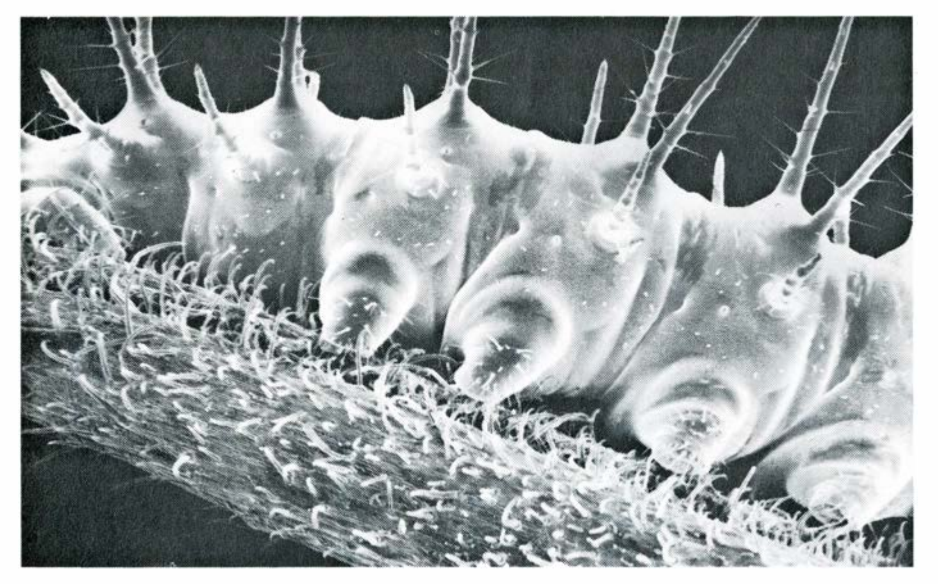
Quizás el caso más destacable de modificación por mimetismo se dé en la especie *P. candollei*. Las estructuras modificadas son los nectarios foliares, que adquieren un aspecto de manchas amarillas parecidas a huevos. Especies afines a esta enredadera tienen sus nectarios foliares dispuestos en dos filas divergentes y la posición ocupada por los nectarios en una hoja es la misma que ocupa en el resto de las hojas de la planta. En las hojas con huevos miméticos de *P. candollei*, sin embargo, el control de la posición de los nectarios en la superficie foliar parece haberse perdido, y éstos se distribuyen al azar. Algunas hojas sólo tienen una mancha amarilla, pero las hay hasta con ocho. El número y posición varían de una hoja a otra en la misma planta. Este sistema de distribución al azar imita la pauta irregular de puesta de muchas especies de *Heliconius*.

Todas estas observaciones sugieren que la hipótesis de protección de la pasionaria por ovomimetismo es válida. De los experimentos de invernadero realizados por Williams y el autor se deducen nuevas razones en su favor; sin embargo, se requieren aún experi-





EFECTOS INHIBIDORES de la presencia de huevos normales y miméticos en un experimento comparativo. Como se ve en la gráfica superior, las hembras de *H. cydno* se sometieron primero a una elección entre pasionarias sin huevos (*barras grises*) y plantas con un huevo normal (*barras de color*). A los 25 segundos se habían depositado ya 113 huevos. La mayoría de los huevos depositados en los 15 primeros segundos se colocaron en plantas desocupadas, el tiempo medio de puesta fue de 9,7 segundos. La mayoría de los huevos dejados en plantas ocupadas se depositaron pasados 15 segundos; el tiempo medio de puesta fue de 21,8 segundos. Como se observa en la gráfica inferior, en el siguiente ensayo las mariposas hembras pudieron elegir entre dos ápices de *P. cyanea*; uno de los dos había sido desprovisto de sus huevos miméticos (*barra gris*) y el otro tenía sus huevos miméticos en sus lugares correspondientes (*barra de color*). Al cabo de 25 segundos se habían depositado 180 huevos. La mayoría de los huevos depositados en los primeros 20 segundos se situaron en la planta desprovista de huevos miméticos, con un tiempo medio de 15 segundos. La mayoría de los huevos puestos en la planta con huevos miméticos se depositaron pasados los 15 primeros segundos, con un tiempo medio de 21,9 segundos. El efecto de inhibición de la puesta de los huevos miméticos iguala, pues, al de los reales. Ilustración de Ilil Arbel.







ORUGA DE *HELICONIUS* CAPTURADA: uno de los propodios ha quedado enganchado en un pelo puntiagudo y cortante de la hoja de una enredadera del género *Passiflora*, según se muestra en esta serie de fotografías al microscopio electrónico de barrido que ilustran semejante método de defensa de algunas especies de este género. Arriba, la captura no se aprecia, pero el apéndice atravesado es el tercero por la derecha. En la ilustración central, la punta del pelo de la planta ha penetrado en la superficie del propodio, en el centro de la fotografía. Abajo se observa la herida provocada por el pelo de la planta en el propodio, debajo del garfio. La planta de la microfotografía es *P. adenopoda*; la oruga, *H. melpomene*.

mentos de campo para determinar si la capacidad de estimar la carga de huevos por parte de las mariposas produce diferencias significativas en la tasa de supervivencia y en el éxito reproductor de pasionarias con huevos miméticos, comparadas con otras de la misma población que no la presenten.

Lo que nos lleva a considerar el tercer aspecto de la interacción entre mariposas *Heliconius* y pasionarias. ¿Qué ocurre en la puesta? ¿Qué en la eclosión? ¿Han desarrollado las pasionarias rasgos para poderse aprovechar de los huevos y orugas del parásito? He identificado en algunas especies de *Passiflora* rasgos hostiles a estos estadios del ciclo vital de los parásitos. Un ejemplo de ello puede verse en la especie *P. ambigua*. Las estípulas de esta planta, largas y en zarcillo, son rápidamente deciduas, desapareciendo al poco de salir. Con la pérdida de las estípulas, todo huevo depositado en ellas muere.

En *P. adenopoda* y en especies afines apreciamos un segundo rasgo que puede haberse desarrollado como medida antioruga. Las superficies de las hojas de estas pasionarias son hirsutas y poseen finos tricomas ganchudos; la mayoría de las orugas de *Heliconius* son incapaces de moverse por las hojas sin ser perforadas y quedar fatalmente inmovilizadas.

Las observaciones y experimentos que he descrito aquí representan sólo una pequeña parte de las relaciones coevolutivas entre las mariposas del género *Heliconius* y las enredaderas del género *Passiflora*. Nos indican, sin embargo, que las interacciones constituyen procesos dinámicos y continuos. Muchas de las diferencias entre diversas poblaciones y especies de pasionarias se deben a las presiones de selección ejercidas por las mariposas.

Diez años atrás creía que este fenómeno era un caso excepcional y extremo de la acción del ambiente tropical. Pero se ha descubierto ya ese mismo fenómeno entre mariposas y plantas de la zona templada. Recordemos las observaciones de Rausher sobre las interacciones entre las mariposas de cola de milano y las enredaderas del género *Aristolochia*. O el ovomimetismo practicado por algunas plantas de la familia de la mostaza descrito por Arthur M. Shapiro, de la Universidad de California en Davis. En cualquier caso, los cientos de especies de *Passiflora* de los trópicos del Nuevo Mundo y los millones de poblaciones locales proporcionan un laboratorio natural para el estudio de la coevolución en todos sus aspectos, genéticos y ecológicos.

Ofiolitas

La corteza terrestre que hay bajo los océanos difiere de la corteza continental. Las ofiolitas parecen ser fragmentos de corteza oceánica situados en tierra. Como tales, brindan indicios sobre la formación y expansión de la corteza oceánica

Ian G. Gass

Sostiene la teoría de la tectónica de placas que la corteza oceánica, que constituye aproximadamente el 70 por ciento de la superficie sólida de la tierra, se ha originado, y sigue creándose constantemente, en los ejes de dorsales y prominencias oceánicas. La corteza se aleja así de esos ejes mediante el proceso de expansión del fondo oceánico hasta sumergirse de nuevo en el interior de la tierra, a lo largo de las zonas de subducción. Este sistema de autodestrucción comporta que no haya hoy parte alguna de la corteza del océano actual con mucho más de 200 millones de años de antigüedad. Los continentes, en cambio, por ser más livianos que la corteza oceánica, no suelen subducirse; por el contrario, se mueven pasivamente sobre la faz de la tierra en respuesta a los procesos de expansión del fondo oceánico y tectónica de placas. Las rocas continentales guardan pruebas sobre acontecimientos de la historia de la tierra que se remontan hasta casi cuatro mil millones de años.

Ocasionalmente, un fragmento de corteza oceánica, en lugar de subducirse, se conserva en el borde delantero de una placa cabalgante en una zona de subducción. Para describir este proceso, Robert G. Coleman, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha acuñado el término obducción: lo contrario de subducción. Coleman ha calculado, además, que no llega al 0,001 por ciento de toda la corteza oceánica la porción obducida que todavía aflora en tierra emergida. Por pequeños que sean estos resquicios, proporcionan una información única acerca de los procesos que actualmente operan bajo los ejes de dorsales y prominencias oceánicas. También brindan indicios de la evolución de antiguos océanos, los mecanismos de colisiones entre placas y la posición de antiguos bordes destructivos de placas, además de sugerir persuasivamente que los procesos de tectónica de placas han funcionado a lo largo de los últimos mil millones de años, por lo menos. Estos fragmentos de corteza oceánica ubicados en continentes se llaman ofiolitas.

Desde el advenimiento de la tectónica de placas, el término "ofiolita", como otras muchas expresiones geológicas, ha adquirido un sentido y una significación nuevos. Pero incluso antes de esta última revolución en las ciencias de la tierra, el significado del término había ido evolucionando en función de los cambios habidos en la comprensión de los procesos geológicos. El término apareció por vez primera en la bibliografía geológica en el decenio de 1820, cuando el francés Alexandre Brongniart lo acuñó para describir rocas conocidas también como serpentinita o peridotita serpentinizada, un tipo de roca ígnea que usualmente se halla en áreas deformadas por procesos tectónicos. "Ofiolita" deriva del término griego *ophis*, que significa serpiente; significa, pues, lo mismo que serpentinita. Ambos términos resultan apropiados para designar a esas rocas sólo en lo que tienen, como algunos reptiles, de apariencia verde moteada. Aparte de demostrar la afición de los geólogos europeos por las lenguas clásicas, "ofiolita" carecía de significado, y se empleó de una forma *ad hoc* durante el siglo XIX y a principios del XX para describir peridotitas serpentinizadas y las rocas comúnmente asociadas a ellas.

En lo que llevamos de siglo hemos asistido ya a dos cambios importantes en la utilización del término. En 1906, el alemán Gustav Steinmann se percató de la íntima asociación entre la peridotita serpentinizada y otras rocas ígneas y sedimentos de aguas profundas (como radiolaritas) en las montañas del plegamiento alpino que rodean el Mediterráneo. Más tarde, en honor de este notable geólogo, a la asociación de serpentinita, radiolarita y lavas almohadilladas (lavas emanadas bajo el agua) se la llamó trinidad de Steinmann. Luego, con el uso corriente, "trinidad de Steinmann" y "ofiolita" llegaron a convertirse en sinónimos. En otras palabras, "ofiolita" ya no designaba un tipo de roca, sino un conjunto interrelacionado de rocas.

Steinmann subrayó particularmente la asociación entre sedimentos de aguas profundas y la serpentinita y lavas almohadilladas. Otros desarrollaron esta línea y sugirieron que las ofiolitas debían ser masas de rocas ígneas emplazadas en geosinclinales: vastas depresiones lineales de la corteza terrestre que llegaban a colmatarse de sedimentos. Algunos investigadores interpretaron que las rocas ígneas se habían inyectado entre las capas de roca sedimentaria en forma de filones-capa, también llamados mantos interestratificados (intrusiones horizontales); otros las consideraron inmensas bolsas de magma (roca fundida) que hicieron erupción en la superficie de los sedimentos a todo lo largo de los flancos del geosinclinal.

Se recurría a la siguiente explicación gráfica: en cuanto la bolsa magmática había hecho erupción, su piel, enfriada y fracturada, se veía invadida por diques (intrusiones verticales) proceden-

OFIOLITA DE LA PENINSULA ARABIGA, representada por las montañas oscuras que atraviesan esta imagen Landsat de Omán septentrional del ángulo superior izquierdo al inferior derecho. El cuerpo de agua de la parte superior derecha es el golfo de Omán, que pone al golfo Pérsico en conexión con el océano Indico. A la zona montañosa se la conoce por manto de Samail. Los tonos claros a la izquierda de la ofiolita oscura corresponden a rocas continentales, principalmente calizas; éstas descansan sobre rocas graníticas de la plataforma continental arábiga. El color oscuro de la ofiolita se debe a la abundancia de basaltos, gabros y peridotitas, rocas características de la corteza oceánica y del manto terrestre subyacente. Las manchitas rojas a lo largo de la costa y en otras zonas son vegetación, que aparece roja a causa de la codificación del color de las longitudes de onda detectadas por los sensores del satélite. Además, para mejorar la imagen, los datos de la imagen Landsat se han procesado en ordenador, tarea efectuada por la Earth Satellite Corporation. El campo visual de la imagen corresponde a 130 kilómetros de sección.



tes del interior todavía fundido de la bolsa. Aparecían luego en su superficie lavas almohadilladas en erupción. A medida que iba cristalizando el interior fundido, los minerales más pesados se decantaban en el fondo y producían peridotitas dispuestas en capas, cubiertas de gabros estratificados.

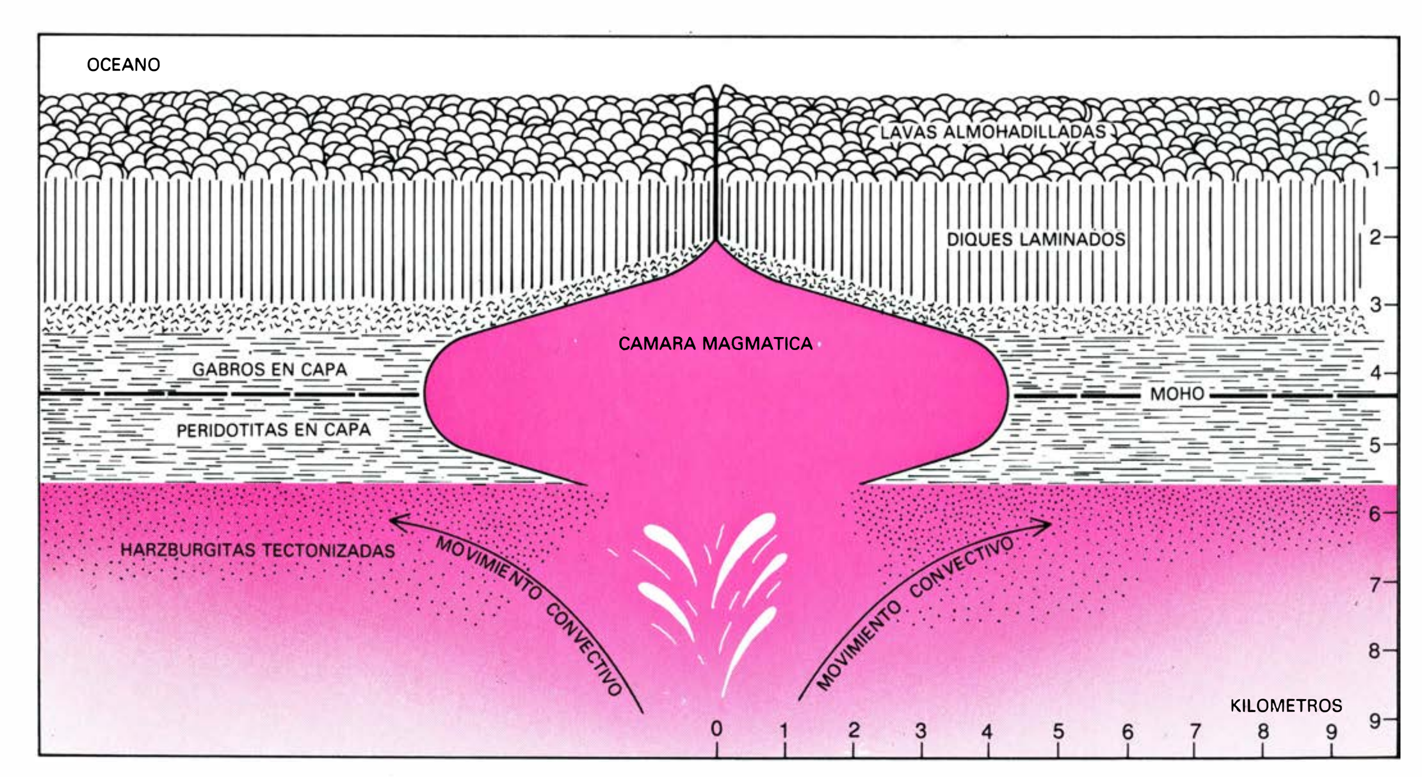
Permítaseme un inciso para definir qué se entiende por "peridotita" y "gabro", términos que habremos de usar de inmediato. En este contexto, se aplican a las rocas de la corteza oceánica y de la parte superior del manto terrestre subyacente. Se cree que la parte superior del manto es de peridotita, una roca que consta de los minerales magnésicos olivino [$(Mg, Fe)_2\ SiO_4$] y piroxeno [$Ca(Mg, Fe)\ Si_2O_6$], casi de una manera exclusiva. Hay también dunita, roca constituida, casi exclusivamente por olivino.

La corteza oceánica está formada por rocas como el basalto y el gabro, algo más ricas en sílice (óxidos de silicio). Los basaltos son de grano fino; los gabros, por haber cristalizado más lentamente, son de grano grueso. Con todo, ambos tipos están constituidos por los mismos minerales: olivino, piroxeno y plagioclasa ($NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$). Los basaltos ocupan la parte más alta, hasta profundidades de uno a 2,5 kilómetros en la corteza oceánica (sin contar los sedimentos que la cubren), y los gabros, los 3,5 a 6 kilómetros subyacentes.

Volviendo al modelo geosinclinal de las ofiolitas, éste se desarrolló en los años 30, 40 y a principios de los 50. Hasta mediado el decenio de 1960 fue la opinión corriente entre geólogos. La esencia del modelo radica en considerar las ofiolitas como resultado de un magmatismo producido durante la fase inicial del desarrollo de un geosinclinal. Se interpretaban como rocas ígneas in situ (autóctonas) y que, hubieran sido inyectadas en forma de filones capa o bien hubieran hecho erupción quedaron interfoliadas entre las rocas sedimentarias del geosinclinal. Pero ese esquema ha cambiado ya. A casi todas las masas ofiolíticas se les atribuye hoy un origen alóctono; es decir, formadas en otro lugar llegaron a su posición actual por transporte tectónico.

Según el modelo vigente, que goza de amplia aceptación, una ofiolita es un fragmento de corteza oceánica, formado en el eje de una dorsal o prominencia oceánica, desplazado a través del fondo oceánico por expansión del fondo del mar y finalmente levantado por encima del nivel del mar. Simultáneamente a este cambio de concepción respecto al origen de las ofiolitas –de considerarlas formadas in situ a transportadas– se ha ido abandonando la noción de geosinclinal que un día dominara la bibliografía geológica.

El cambio total en las ideas sobre el origen y significado de los complejos ofiolíticos se produjo a raíz de investigaciones de diversa índole. Primero, se demostró que prácticamente todas las ofiolitas eran alóctonas, que se pusieron en contacto con las formaciones rocosas adyacentes a través de procesos tectónicos. Segundo, estudios detallados sobre ofiolitas del Mediterráneo oriental, en particular del macizo de Troodos, en la isla de Chipre, demostraron que su estructura interna no era compatible con el supuesto de una formación in situ en un geosinclinal. Sólo podía explicarse de un modo fundamentado a partir de procesos magmáticos como los que ocurren en dorsales y prominencias oceánicas, donde se genera corteza oceánica nueva. Tercero, se constató que en todas las ofiolitas del



CORTE ESQUEMATICO DE CORTEZA OCEANICA, basado en estudios sobre ofiolitas. En el centro se halla el eje de una dorsal o prominencia oceánica. En la parte superior de la corteza (salvo una delgada capa de sedimento que no se ha representado) hay lavas almohadilladas: lavas que han hecho erupción en el fondo oceánico por el eje de la dorsal o prominencia oceánica o sus inmediaciones. Debajo de las lavas almohadilladas hay diques laminados: lajas verticales que originariamente se inyectaron en el eje de la dorsal o prominencia y que luego se desplazaron hacia afuera junto con el fondo oceánico en expansión. Bajo los diques laminados hay gabros de grano grueso y carentes de estructura, que representan masas fundidas, cristalizadas en contacto con el techo de la cámara magmática. Gabros y peridotitas dispuestos en capas representan a los minerales que cristalizaron dentro de la cámara; "Moho" (por discontinuidad de Mohorovičić) representa el límite entre ambos. Bajo las peridotitas en capa se encuentran harzburgitas tectonizadas (deformadas) constituidas por olivino y ortopiroxeno. Con la disminución de la presión hacia arriba, la peridotita del manto empieza a fundirse y el líquido basáltico así formado se acumula en masas globuliformes, diapiros. Los diapiros ascienden con el manto sometido a convección. Por el camino, el mineral olivino se separa de él, precipitado, pero el líquido restante en la masa fundida escapa hacia arriba para reponer el magma en la cámara.

Mediterráneo oriental se podía identificar la misma serie rocosa y compararla con capas del fondo marino deducidas de indicios geofísicos. Cuarto, se demostró que los tipos de roca de las ofiolitas eran parecidos a los extraídos del fondo del océano profundo.

La similitud de las distintas series ofiolíticas, entre sí y con las series oceánicas, y la afinidad entre las rocas oceánicas y las ofiolíticas (demostrada por Nikolas I. Christensen, de la Universidad de Washington, y Matthew H. Salisbury, hoy en la Institución Oceanográfica Scripps) llevaron a la aceptación general de que las ofiolitas debían ser fragmentos de corteza oceánica formada en dorsales y prominencias oceánicas. Desde entonces constituye práctica común servirse de los datos sobre ofiolitas para revestir el esqueleto, necesariamente magro, de datos oceanográficos sobre estructuras de dorsales y prominencias oceánicas. Esta concepción recibió el respaldo general en la década de 1970; con todo, cuando los participantes en la Reunión Penrose sobre Ofiolitas, de la Sociedad Geológica de Estados Unidos, redefinieron el término, en 1972, subrayaron que éste debería aplicarse únicamente a una determinada asociación de rocas y que no involucraría ninguna connotación relativa al origen.

Una ofiolita completa, como la relativamente poco deformada del macizo chipriota de Troodos, es una serie ordenada de tipos de roca. En la mayoría de los casos, los procesos de obducción han perturbado la masa originariamente coherente y han desparramado pedazos de la ofiolita por toda una gran extensión. A menudo pueden volver a ensamblarse las partes componentes de una ofiolita tan desmembrada desenmarañando el rompecabezas tectónico. Pero resulta más sencillo estudiar ofiolitas relativamente poco deformadas, como el macizo de Troodos y el manto Samail del sultanato de Omán, en la península Arábiga. Lo que justifica que la descripción general que se expone a continuación se base, en gran parte, en esos estudios.

De arriba abajo, la mayoría de ofiolitas están cubiertas por sedimentos marinos. En algunos casos, así en las ofiolitas chipriotas y omanitas, los sedimentos son argilita ferromangánica de profundidad o radiolarita. En otros, los sedimentos recuerdan los de las plataformas continentales o los adyacentes a arcos de islas volcánicas. Ello indica que la corteza oceánica de la que procede la ofiolita debió hallarse cerca del margen de un continente o de un arco insular en alguna etapa de su historia. Y lo más destacado, estos sedimentos ofrecen indicios relativos al ambiente de cuenca oceánica en que se encontró la ofiolita antes de que fuera levantada por encima del nivel del mar; a este respecto, las investigaciones de Alistair Robertson, de la Universidad de Edimburgo, y Alan Gilbert Smith, de la Universidad de Cambridge, revisten particular interés.

El techo de la ofiolita propiamente dicha consta de basaltos de extrusión. Muchas de estas rocas presentan las formas almohadilladas características de lavas que han hecho erupción bajo el agua. La verdad es que se ha llegado a filmar la formación de este tipo de lava en el transcurso de una erupción submarina junto a Hawai. También se han identificado reiteradamente lavas almohadilladas desde sumergibles tripulados y no tripulados que han investigado el fondo del valle tectónico (rift) axial de la dorsal mesoatlántica y la zona axial de la dorsal del Pacífico oriental.

Hay almohadillas de lava casi esféricas; a otras, más alargadas, sería más apropiado llamarlas cojines. La forma del almohadillado probablemente dependa de la configuración del fondo marino donde hace erupción la lava. En laderas abruptas, la masa fundida forma glóbulos que descienden rodando cuesta abajo y se acumulan a su pie. Los cojines alargados se forman, verosímilmente, en vertientes de menor pendiente, donde la lava resbala un trecho antes de solidificarse. Cuando la lava hace erupción en hoyos o en superficies planas, es probable que no origine almohadillas, sino capas carentes de estructura y de espesor variable.



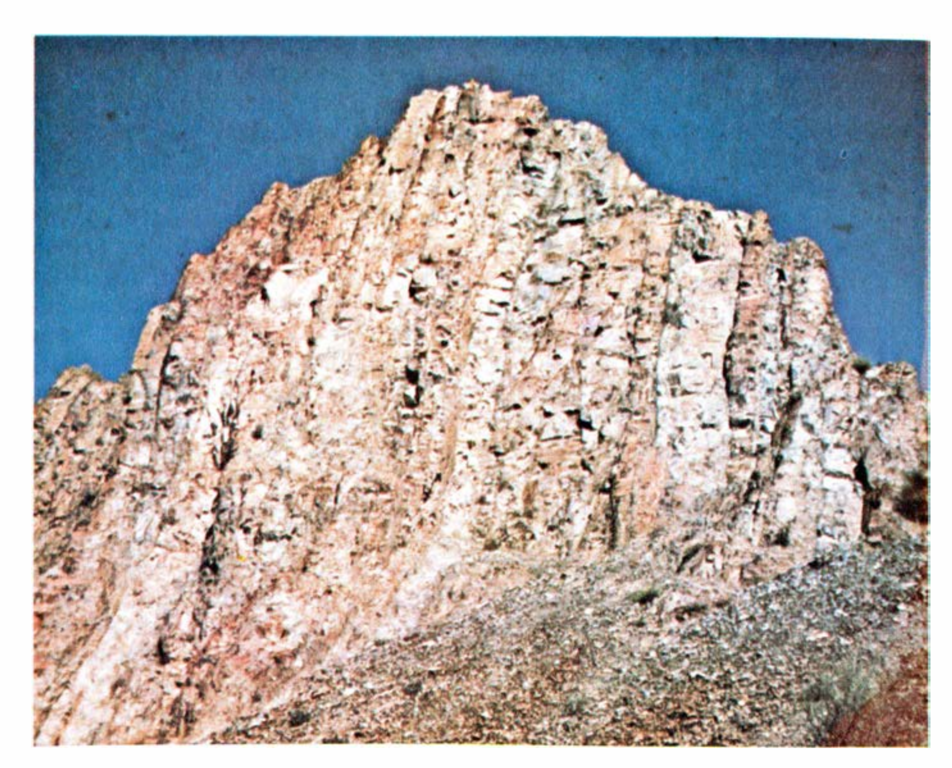
LAVAS ALMOHADILLADAS en el uadi Jizzi, excavado en el manto de Samail, Omán. Estas almohadillas alargadas probablemente hicieron erupción en una ladera de poca pendiente del fondo oceánico y bajaron un trecho corto, desde la parte superior derecha a la inferior izquierda, antes de solidificarse.

Se sabe que se forman lavas almohadilladas en aguas muy profundas, en aguas someras e incluso allí donde lavas de erupción subaérea fluyen hasta el agua. Su contenido en burbujas o vesículas de gas indica cuánta agua tenían encima en el momento de su formación. Se presentan tales vesículas cuando el gas disuelto en una roca fundida se separa de la masa fundida al remitir la presión. Pero si la presión del agua suprayacente se mantiene lo suficientemente elevada, el gas no se separa y no se forman vesículas. Midiendo la vesicularidad de basaltos de profundidades conocidas, James G. Moore, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha demostrado que existe una correlación tosca entre la profundidad bajo agua a la cual hizo erupción una lava y la vesicularidad de la lava; a mayor profundidad (presión) la vesicularidad resulta menor. Lo que sólo debe tomarse como mero indicio aproximado de la profundidad, por cuanto la abundancia del gas en el magma varía. Además, la expansión del fondo oceánico puede trasladar una lava a una profundidad distinta de aquella en que hizo erup-

ción. Con todo, la vesicularidad constituye un dato más del origen de las ofiolitas en dorsales y prominencias oceánicas.

La mayoría de las lavas presentes en ofiolitas son basaltos, parecidos a los que se extraen de las dorsales oceánicas actuales. En Omán, sin embargo, únicamente la parte inferior de la pila de lavas y los diques subyacentes guarda un parecido químico con los basaltos de dorsal oceánica. La parte superior de la serie de lava difiere geoquímicamente de la inferior; Julian A. Pearce y Tony Alabaster, de la británica Universidad Nacional a Distancia, han demostrado de forma convincente que estas lavas superiores hicieron erupción en un ambiente de arco insular, posteriormente a la época del principal acontecimiento de expansión del fondo oceánico. En Chipre todas las lavas tienen una composición parangonable con la de rocas volcánicas que han hecho erupción en una zona de subducción.

El techo de la pila de lava está constituido íntegramente por rocas extruidas. A medida que se desciende crece el número de diques. Muchos son sinuosos y, según parece, tuvieron que abrirse paso hacia arriba a través del montón de lava. El grosor de la pila de lava varía; en el macizo de Troodos mide, aproximadamente, un kilómetro y, en Omán, oscila entre 0,5 y 1,5 kilómetros. Cerca de la base de la serie la proporción entre diques y lavas es de 1:1; luego, hacia abajo, en un trecho de 50 a 100 metros, la cantidad de diques aumenta del 50 al 100 por ciento y apenas hay lava, cuando la hay, de uno a otro. Además, la disposición de los diques no es sinuosa, sino regular y a menudo casi vertical. Esta parte de la ofiolita recuerda la imagen que forma una baraja de naipes que se apoye sobre su canto. Se la ha llamado complejo de diques laminados.



COMPLEJO DE DIQUES LAMINADOS en el manto de Samail. Cada dique, originariamente una intrusión de roca fundida, es una lámina vertical de roca. Cada una se inyectó hacia arriba a lo largo del eje de una dorsal o prominencia oceánica. El movimiento convectivo hacia fuera del manto subyacente [*véase la ilustración de la página 76*] produce tensión y, cuando se abre una grieta de tensión, el magma procedente de la cámara se escapa hacia arriba y se forma otro dique. Por término medio, los diques miden un metro de grosor. Por tanto, el fondo del mar crece a hornadas de un metro cada 50 a 100 años, y no con la supuesta regularidad de dos centímetros anuales considerada en los modelos de geofísica teórica.

En la década de 1950, antes de la enunciación de la tectónica de placas, el principal escollo conceptual con que tropezaban los estudios sobre ofiolitas venía del complejo de diques laminados. En ningún otro lugar se había encontrado otro complejo rocoso constituido íntegramente por diques. En regiones volcánicas fósiles clásicas, como la provincia hebridense del noroeste de Escocia, la proporción de diques en relación con el total de roca que aflora no llega al 10 por ciento. Por esta razón, la investigación se encaminaba siempre a la búsqueda de la roca encajante en la que se hubieran emplazado los diques. Cualquier roca que pareciera ligeramente diferente se estudiaba con detenimiento: las supuestas rocas encajantes de los diques solían ser coladas de basalto carentes de estructura. Que yo sepa, a nadie se le ocurrió entonces la posibilidad de que no hubiera roca encajante alguna. Sólo después de demostrarse que existía una estructura con el 100 por ciento de diques en el complejo de diques laminados del macizo de Troodos, poco deformado y con buenos afloramientos, se empezó a buscar y a identificar dicha estructura en masas más deformadas.

Cuando se propuso el modelo de la tectónica de placas, se constató que el eje de una dorsal o una prominencia oceánica constituía el lugar preciso donde se formaría un complejo con el 100 por ciento de diques. El esquema actual postula que la mayoría de los diques se inyectan a lo largo de una zona angosta, de no más de 50 metros de anchura, en el eje de la dorsal o prominencia, y que el material que constituye los diques se aleja del eje por expansión del fondo del mar. Estudios recientes sobre complejos de diques laminados, no lastrados por ideas geológicas preconcebidas, demuestran que esta parte del complejo ofiolítico está formada, en un 100 por ciento, por diques.

Johnson R. Cann y Rupert G. W. Kidd, a la sazón en la Universidad de East Anglia, identificaron en los diques el fenómeno de enfriamiento de sentido único, que puede explicarse del modo siguiente. El magma inyectado en una fisura de la roca fría formará un cuerpo con aspecto de dique. La masa fundida se enfriará con la máxima rapidez y, por consiguiente, constituirá la roca de grano más fino en el contacto con la roca encajante fría. Cann y Kidd apreciaron que en el macizo de Troodos muchos diques tenían un solo borde de enfriamiento, no dos. Y había más bordes de enfriamiento en un lado de los diques que en el otro; este es el fenómeno de enfriamiento de sentido único.

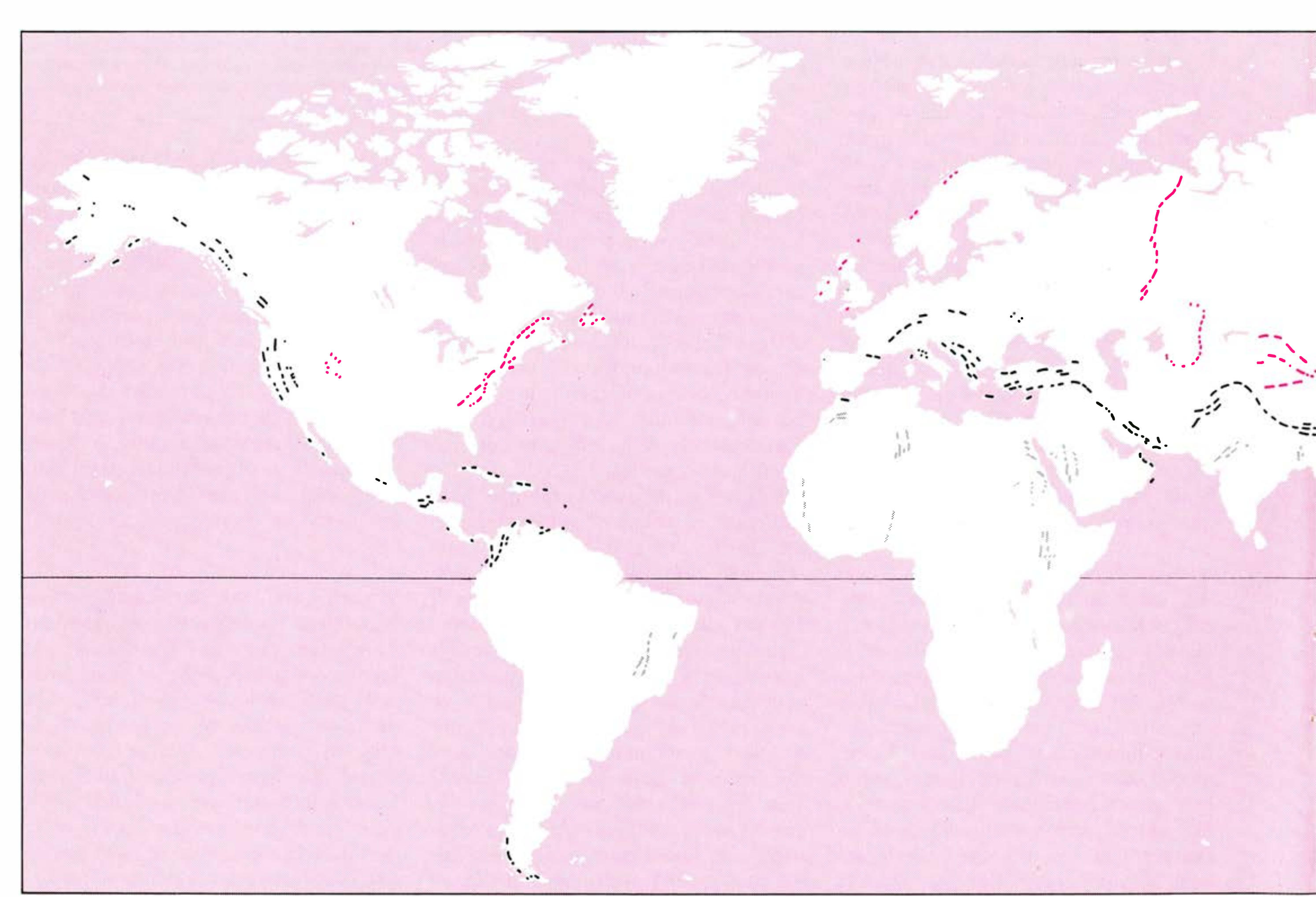
Cann y Kidd sugirieron que, en una dorsal oceánica, el magma tendería a inyectarse a lo largo del eje aún líquido o más blando de un dique anterior, partiéndolo en dos mitades; una mitad se alejaría en un sentido y, la otra, en el opuesto. A cada lado de la dorsal, los diques presentarían un enfriamiento preferente de sentido único en el borde más distante del eje de la dorsal. Sobre esta base se ha supuesto que la dorsal oceánica donde se formaron los diques norte-sur del macizo de Troodos queda al oeste del lugar que hoy ocupa el afloramiento. Conviene subrayar que el exceso estadístico de enfriamientos de sentido único de un

lado en comparación con el otro es pequeño, y también que sólo muy rara vez se encuentran afloramientos continuos con un número de diques estadísticamente válido. El enfriamiento de sentido único es una idea atractiva que, además, parece intuitivamente aceptable, pero carece de demostración empírica.

Los complejos de diques laminados constituyen la mejor prueba de que las ofiolitas nacieron a lo largo de zonas de tensión en dorsales y prominencias oceánicas; sin embargo, no siempre se presentan esos complejos. Así, en la ofiolita Voúrinos de Grecia, según la ha descrito Eldridge M. Moores, de la Universidad de California en Davis, los diques laminados están poco desarrollados. Se ha sugerido que los complejos de diques laminados se forman únicamente en caso de que la expansión del fondo oceánico sea lo suficientemente lenta para permitir que un dique se solidifique antes de la inyección del siguiente. Puesto que la corteza oceánica se enfría rápidamente y se filtra agua marina a través de todo este material, la explicación es discutible. Además, la ofiolita de Omán, dorsal oceánica fosilizada donde el fondo oceánico se expandía en ambos sentidos a la elevada velocidad de dos centímetros por año, posee un magnífico complejo de diques laminados. Si bien la ausencia de complejos de diques laminados en algunas ofiolitas sigue siendo un problema geológico, vale la pena señalar que muchas ofiolitas, descritas en un principio como carentes de complejo de diques laminados, examinadas más detalladamente han revelado tener uno.

Los diques de un complejo laminado deben proceder de una fuente de magma subyacente. A nadie sorprenderá, pues, que, con el aumento de la profundidad, los diques basálticos dejen paso, en un trecho de entre 10 y 100 metros, a rocas gabroides de composición parecida pero de textura granuda marcadamente más gruesa. La cartografía detallada de estos complejos plutónicos (es decir, de estas rocas ígneas formadas muy lejos de la superficie) induce a creer que los gabros superiores, los que constituyen una capa de 10 a 300 metros de grosor, se formaron por una masa fundida en proceso de enfriamiento y cristalización en contacto con el techo de una cámara, a partir de la cual el magma fluía hacia la superficie. Debajo de aquella capa, los gabros y las peridotitas subyacentes, si los hay, están marcadamente estratificados. Hasta hace poco se consideraba que la disposición en capas resultaba de la cristalización de los minerales a partir de la masa fundida y de su decantación en el fondo de la cámara magmática.

Alexander R. McBirney y Richard M. Noyes, de la Universidad de Oregón, han propuesto un mecanismo alternativo después de estudiar los clásicos gabros con estructura en capas de Skaergaard, en Groenlandia oriental. Sugieren que los gradientes de composición química y calor determinan que ciertos minerales cristalicen y se separen de la masa fundida según planos horizontales de la propia masa; no hace



DISTRIBUCION MUNDIAL DE OFIOLITAS. En negro, ofiolitas con menos de 200 millones de años de antigüedad. En rojo, ofiolitas de 200 a 540 millones de años. En gris, ofiolitas con edades comprendidas entre 540 y 1200 millones de años. Las ofiolitas más modernas son las relacionadas con el ciclo actual de tectónica de placas. Incluyen las ubicadas en torno al Pacífico y todas las próximas a lugares donde hay corteza oceánica sometida a subducción. Las que les siguen en edad (que se extienden desde los Apalaches hacia el norte, por Nueva Escocia y Terranova, y se continúan hacia Irlanda, Escocia y Noruega) señalan el cierre del océano Yapeto, en la era Paleozoica. Las ofiolitas de la Unión Soviética también indican una sutura paleozoica de

falta ningún movimiento de los cristales para explicar la disposición en capas. Tanto si los cristales se decantan como si forman capas in situ, lo que indican las rocas plutónicas de estructura en capas es que existe un gran cuerpo de magma bajo la superficie a lo largo del eje de una dorsal o prominencia oceánica. De la investigación sobre el macizo de Troodos que llevó a cabo Cameron R. Allen, de la Universidad de Cambridge, se desprende que a lo largo de este eje de expansión lenta (un centímetro al año) existían numerosas cámaras magmáticas de cuatro o cinco kilómetros de diámetro. En cuanto a la ofiolita omanita, de expansión más rápida (dos centímetros por año), parece que las cámaras magmáticas tenían unos 20 kilómetros de diámetro.

Estas rocas plutónicas dispuestas en capas revelan que bajo el eje de las dorsales oceánicas había cámaras magmáticas cuyas dimensiones dependían esencialmente de la entrada de calor en la dorsal desde el manto terrestre subyacente y de la tasa de enfriamiento determinada por la expansión del fondo oceánico. Sin embargo, ¿representan estas rocas dispuestas en capas un único cuerpo de magma que cristalizó completamente? O bien, lo que intuitivamente parece más verosímil, ¿se alimentaba el cuerpo magmático periódicamente desde abajo? Estudios realizados por E. Dale Jackson, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, en la masa Voúrinos de Grecia, por Cameron Allen en el macizo de Troodos y por John D. Smewing y Paul Browning, de la Universidad a Distancia, en el manto de Samail de Omán, demuestran que en todas estas ofiolitas la masa fundida se reponía periódicamente con nuevas hornadas de magma.

Mediante el análisis de ofiolitas distintas, esos investigadores han demostrado que las series dispuestas en capas constan de ciclos repetitivos que empiezan con dunita y, en sentido ascendente, pasan a peridotitas y luego a gabros. El ciclo vuelve a empezar y se repite muchas veces en el conjunto de la serie de capas. La conclusión ineludible es que la composición de la masa fundida en la cámara principal se restablecía periódicamente gracias a una nueva entrada de magma.

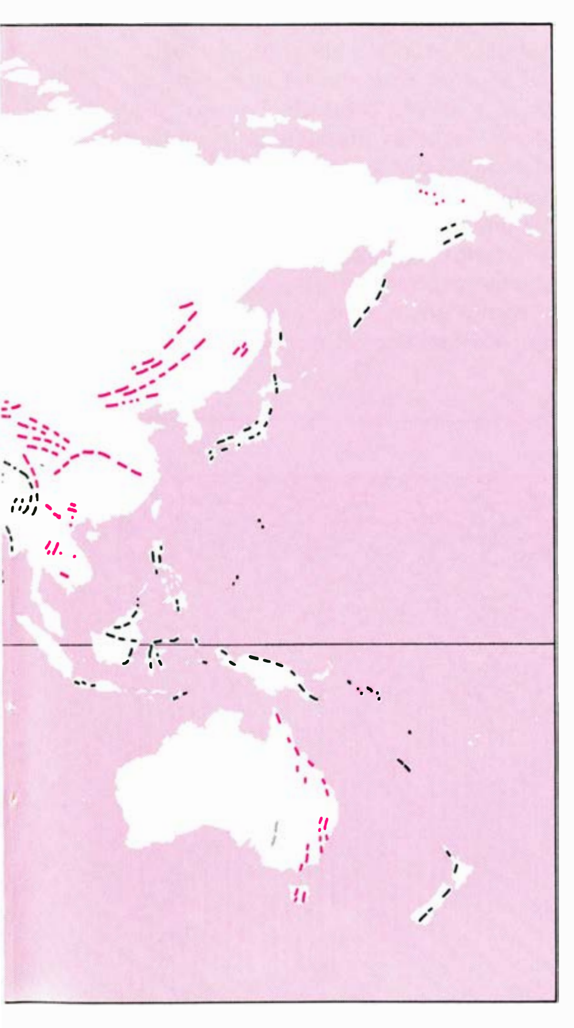
En la base de todas las series ofiolíticas completas hay una peridotita tectonizada (deformada) constituida casi íntegramente por los minerales olivino y ortopiroxeno [(Mg,Fe) SiO_3]. Las peridotitas de esta composición reciben el nombre de harzburgitas, por cuya razón se alude a ellas como harzburgitas tectonizadas. La homogeneidad química y mineralógica de las harzburgitas tectonizadas induce a creer que representan material de la parte más alta del manto, de la cual se ha extraído líquido basáltico. Apoyan esta propuesta la presencia entre las harzburgitas tanto de vainas de gabro –la mejor explicación de su presencia es que deben ser grumos de masa basáltica fundida que cristalizaron antes de que pudieran escapar del manto– como de gabarros de peridotita de una composición diferente (lherzolitas) que probablemente representan restos de manto del que se había extraído poco o ningún magma basáltico.

La mayoría de investigadores aceptan que la harzburgita tectonizada representa manto empobrecido, el residuo resultante de la extracción de masas fundidas basálticas para constituir las rocas suprayacentes: de abajo arriba, las rocas plutónicas dispuestas en capas, el complejo de diques laminados y las series de lavas. El modelo propuesto para explicar estas características sostiene que, a profundidades de 25 o 30 kilómetros, se produce la primera separación de magma basáltico del manto. Los dos componentes, el magma y la harzburgita, ascienden en virtud de la influencia de la convección que tiene lugar en el manto.

El magma ascendente se acumula en cuerpos globuliformes, llamados diapiros, de uno a cinco kilómetros de diámetro. Los diapiros se desplazan hacia arriba con el material del manto que sube y, conforme ascienden, el olivino cristaliza separándose de la masa fundida y constituyendo una capa de cristales en el fondo del diapiro. La masa fundida escapa hacia la cámara magmática principal, pero el olivino se queda en el manto en forma de lentejones de dunita en el seno de la harzburgita tectonizada, y se mantiene sólido a pesar de que la harzburgita está caliente. Por eso se deforma, primero al ascender y luego al desplazarse lateralmente bajo el eje de la dorsal o prominencia oceánica.

Los datos con los que se cuenta inducen a creer que la corteza oceánica acabada de formar se transporta mediante este movimiento convectivo en el seno del manto subyacente. Apoyan esta idea algunas investigaciones detalladas, en particular las de Adolphe Nicolas y sus colaboradores, de la Universidad de Nantes; demuestran, además, que la deformación tuvo lugar unos 1000 grados Celsius e imprimió a la harzburgita tectonizada una fábrica lineal, perpendicular a la orientación del eje de la dorsal suprayacente.

Así pues, los estudios de ofiolitas han revelado gran parte de las características estructurales y magmáticas propias de dorsales y prominencias oceánicas fósiles. ¿Qué más nos dicen de la corteza oceánica? Repetidamente (en promedio cada 30 kilómetros), dorsales y prominencias oceánicas están desarticuladas por fracturas. Dichas fracturas, llamadas fallas transformantes, hacen geométricamente posible que placas rígidas se desplacen por la superficie de una tierra casi esférica. Aunque las ofiolitas sólo representen el 0,001 por ciento de la corteza oceánica subducida, con tal que una de ellas haya conservado más de 30 kilómetros de corteza oceánica podemos esperar que conserve una falla transformante. Estructuras de fallas transformantes han sido estudiadas por mi antiguo colega Kapo Simonian, en Chipre, Ian Abbott y Frank Moseley, de la Universidad de Birmingham, en la isla omanita de Masirah, y John F. Dewey y sus colaboradores, de la Universidad estatal de



choque de placas. No todas las ofiolitas reseñadas aquí se han identificado positivamente. Por ejemplo, la mayoría de ofiolitas de la China continental no están descritas con precisión. Esta y las dos siguientes ilustraciones son de Andrew Tomko.

Nueva York en Albany, en la parte occidental de Terranova. Los accidentes visibles en estas estructuras a diversos niveles, dejados al descubierto por la erosión, nos ayudan a conocer mejor las fallas transformantes actuales.

Otro rasgo de relación de las ofiolitas con la corteza oceánica es su metamorfismo, es decir, el hecho de que sus rocas hayan experimentado una gran alteración desde su origen. Prácticamente todas las rocas ígneas extraídas de la corteza oceánica con dragas o con tubos de perforación a partir de los ejes de dorsales y prominencias oceánicas están metamorfizadas. A diferencia de la mayoría de rocas metamórficas continentales, esas rocas metamórficas oceánicas no presentan fábrica direccional. Por consiguiente, se alteraron sin experimentar la deformación que comúnmente acompaña al metamorfismo continental.

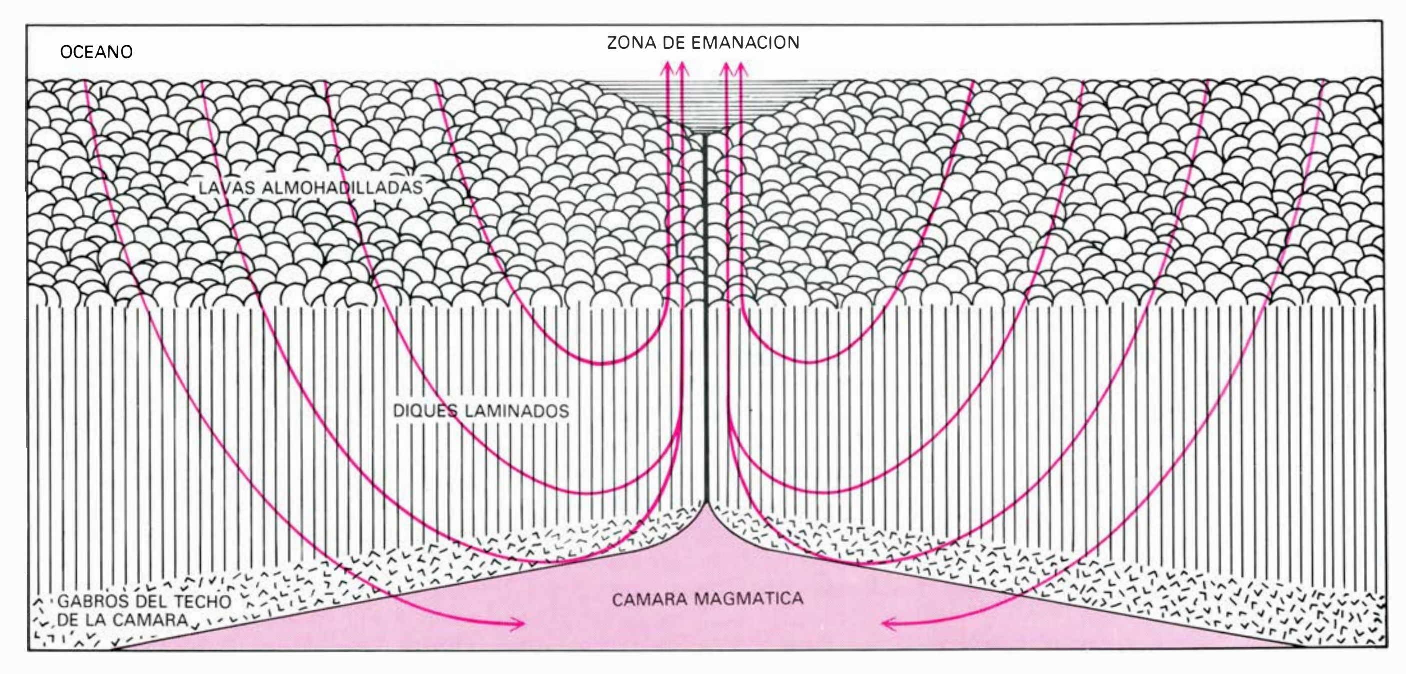
Dado que los procesos metamórficos actuaron mientras las ofiolitas formaban parte de la corteza oceánica, y puesto que no hay fábrica direccional, el principal agente de metamorfismo debió de ser el calor. La fuente principal de calor es el magma subyacente. Entre los procesos metamórficos se contaba la circulación de agua marina a través de corteza oceánica todavía caliente acabada de formar con un gradiente térmico de más de 150 grados Celsius por kilómetro vertical. Se cree que el agua debía circular por convección en un ciclo de circuito simple, por el que las rocas permeables de la corteza oceánica se recargaban de agua continuamente a lo largo y lo ancho de una extensa superficie y expulsaban agua por encima de los altos termales.

El agua marina sujeta a convección lixivia metales de la corteza oceánica y redistribuye silicio y otros elementos. Al volver a la superficie, los fluidos enriquecidos en metales se canalizan a lo largo de fallas, con lo cual la emisión de los fluidos en el agua marina queda circunscrita. En puntos abrigados favorables, como las depresiones del fondo marino, la reacción química entre las salmueras calientes, enriquecidas en metales, y el agua marina determina la precipitación de sulfuros de hierro y cobre y la formación de cuerpos compactos de minerales sulfurosos, así como la precipitación de hierro con manganeso para formar sedimentos ferromangánicos. Desde sumergibles tripulados a lo largo de la dorsal del Pacífico oriental se han visto ya fumarolas hidrotermales que emiten salmueras ricas en metales.

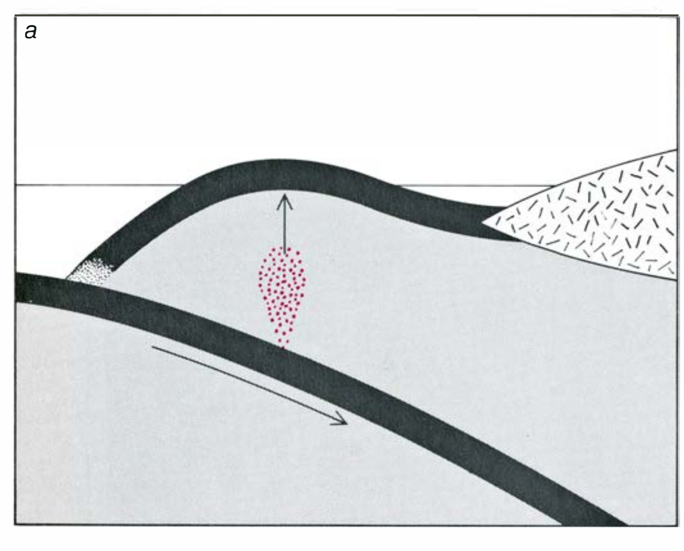
Estos estudios sobre el metamorfismo han permitido interesantes avances en la comprensión de la tectónica de placas y procesos relacionados. Así, durante mucho tiempo se había sostenido, por parte de Nikolas Christensen y Matthew Salisbury sobre todo, que la disposición en capas horizontales de la corteza oceánica, identificada a partir de la velocidad de ondas sísmicas, es un fenómeno metamórfico y que el cambio de velocidad, desde la que caracteriza a la capa segunda que está encima (5,07 kilómetros por segundo) a la que caracteriza a la de debajo (6,69 kilómetros por segundo), representa el cambio de un tipo de metamorfismo a otro. Ciertamente, en las ofiolitas el cambio de complejo de diques a gabros tiene lugar aproximadamente al mismo nivel que un cambio en el tipo de metamorfismo. Ambos cambios podrían influir en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través de la corteza oceánica.

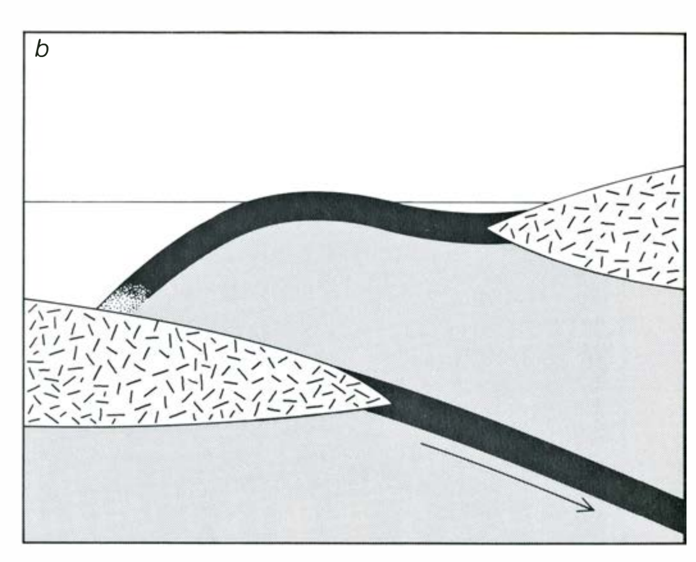
Hasta aquí nos hemos ocupado de la estructura, composición y características metamórficas de las ofiolitas, así como de su valor interpretativo de la geología oceánica. Otra cuestión distinta que plantean las ofiolitas es que, si representan corteza oceánica formada en dorsales y prominencias oceánicas, ¿cómo se emplazan junto a bordes destructivos de placa adyacentes a continentes y arcos insulares? A este proceso remite el término obducción. Los procesos reales de obducción no se comprenden bien y habrá que ahondar más en el término y en sus implicaciones.

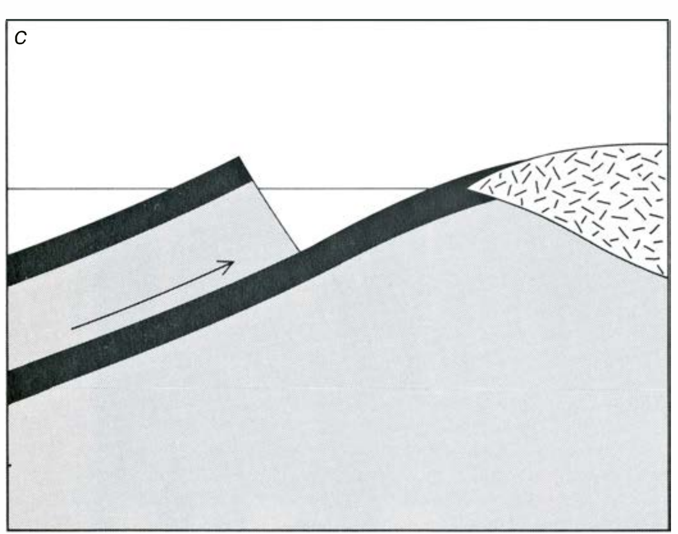
Casi desde el mismo instante en que se propusieron los procesos de tectónica de placas, se incorporó la palabra subducción a la bibliografía geológica. El vocablo procede del latín *sub*, debajo, y *ducere*, conducir. Por eso "subducir" significa literalmente "conducir debajo". Contrariamente a "sub", "ob" implica que el movimiento se produce de una manera contraria a la habitual. Por tanto, obducción implica un movimiento contrario a subducción, un movimiento por encima, y no por debajo. Implica también un movimiento ascen-

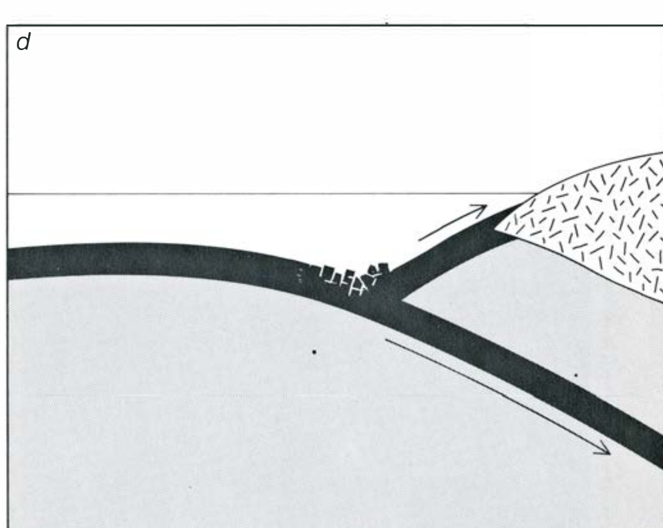


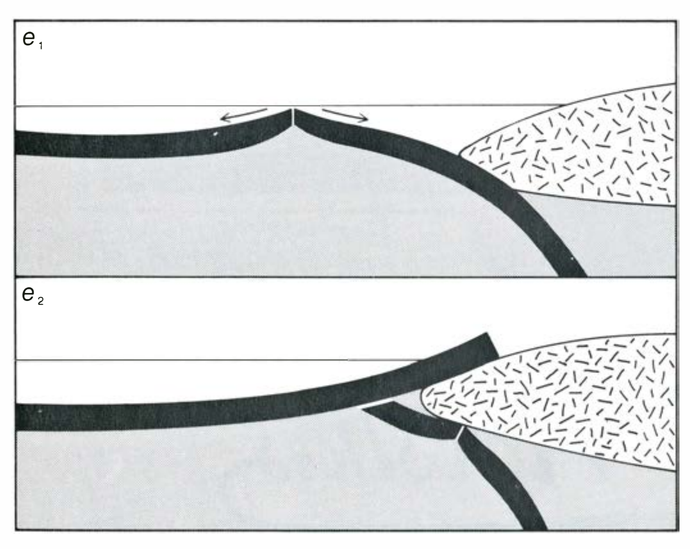
AGUA MARINA QUE SE FILTRA a través del fondo oceánico caliente en las inmediaciones de un eje de expansión. El agua se calienta al atravesar la corteza oceánica acabada de formar e incorpora los elementos que se disuelven con facilidad. Las salmueras calientes y ya enriquecidas retornan a la superficie del fondo oceánico a lo largo de zonas de fractura. Los elementos disueltos precipitan donde el agua caliente vuelve a entrar en el océano.

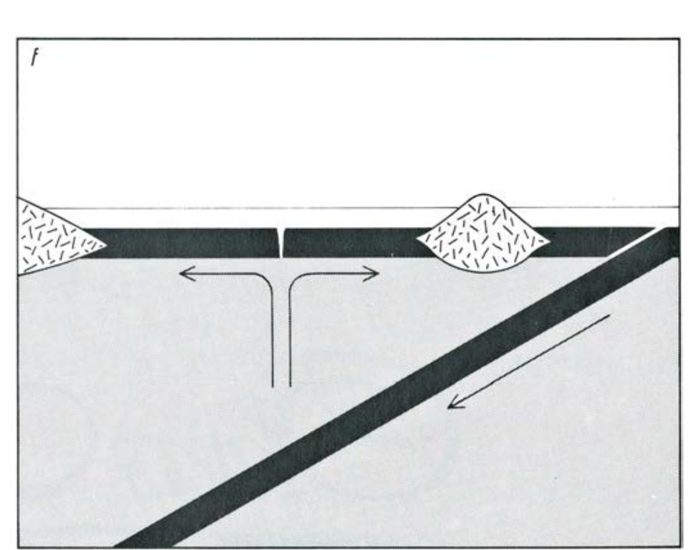












EL EMPLAZAMIENTO DE OFIOLITAS en tierra emergida puede producirse por varios procesos, ninguno de los cuales se comprende plenamente. Se proponen aquí seis modelos posibles. En el modelo *a*, la corteza oceánica (*banda arqueada en el centro*) unida a un continente o a un arco insular (*cuerpo lenticuliforme a la derecha*) se levanta cuando, bajo ella, se produce subducción de otra corteza oceánica. El agua incluida en la corteza oceánica subducida se libera al calentarse la corteza y altera el material del manto que tiene encima (peridotita) y lo convierte en otro que, por ser menos denso, levanta la corteza oceánica suprayacente. En el modelo *b*, la corteza continental se subduce bajo corteza oceánica; dado que la corteza continental es más liviana que el material de encima, tiende a ascender y, al hacerlo, levanta todo lo que reposa en ella. En el modelo *c*, la corteza oceánica sube (*flecha*) a lo largo de una zona inclinada hacia afuera de la masa continental. En el modelo *d*, la corteza oceánica se fractura y fragmenta y caen bloques de ella en una fosa oceánica cercana; bloques de corteza oceánica de este tipo se encuentran en mezclas tectónicas con una matriz de serpentinita o de sedimento fangoso. En el modelo *e*, la dorsal oceánica se desplaza hacia una zona de subducción (e_1). Sobre la cámara de magma la corteza es delgada (*véase la ilustración de la página 76*), razón por la cual la parte de la corteza más distante de la zona de subducción (a la izquierda del eje de expansión), en lugar de subducirse, flota lo bastante para cabalgar sobre el margen continental (e_2). En el modelo *f* se representa un cuadro más regional. Se cree que la mayoría de ofiolitas representan corteza oceánica que se ha creado por expansión del fondo oceánico en un mar marginal situado encima de una zona de subducción. Su emplazamiento en el margen de un continente o de un arco insular podría deberse a cualquiera de estos procesos, o bien a una combinación de ellos.

dente de la corteza oceánica, aunque sigue siendo un enigma el modo preciso en que se produce este movimiento.

La explicación más sencilla que suele darse de la presencia de ofiolitas en tierra emergida es aquella que las entiende como fragmentos de corteza oceánica unidos a un continente o arco insular. En virtud de la subducción de corteza oceánica hacia el lado oceánico de la futura ofiolita, tanto el continente (o el arco insular) como la corteza oceánica pegada a él quedan encima de una zona de subducción. Para que la corteza oceánica aflore en ofiolita debe elevarse por encima del nivel del mar. Lo que puede ocurrir por caminos diversos.

Si la placa que se sumerge es oceánica, arrastrará consigo al interior del manto el agua presente en minerales metamórficos que la contengan, como ceolitas y anfíboles. Al ser subducidos, estos minerales se calentarán y soltarán agua, lo que convertirá parte de la peridotita del manto suprayacente en serpentinita. La serpentinización de la peridotita aumenta su volumen y la vuelve más liviana; y así tiende a subir. El proceso contribuye al levantamiento de la corteza y el manto suprayacente.

Otra vía. Si la ofiolita potencial cabalga sobre corteza continental, la presencia en profundidad de rocas continentales de densidad menor perturbará el equilibrio normal y provocará levantamiento. En 1963, David Masson-Smith, del Instituto de Ciencias Geológicas, y el autor, investigando variaciones de gravedad sobre el macizo de Troodos, propusimos que esta ofiolita debió levantarse por encima del nivel del mar al cabalgar sobre corteza continental. El proceso se intensificó por el ascenso de una masa de serpentinita bajo lo que hoy es el centro del macizo. Postulan mecanismos similares, que implican el cabalgamiento de la ofiolita consiguiente sobre una placa oceánica, colegas míos de la Universidad a Distancia, que han investigado la ofiolita de Omán, y Daniel E. Karig, de Cornell, para explicar la ofiolita de Zimbales, en las Filipinas.

El estudio de las rocas metamórficas subyacentes a las ofiolitas apoya el mecanismo del cabalgamiento. Muchas ofiolitas, en especial las de Terranova y Omán, reposan sobre una capa delgada de rocas metamorfizadas que separan la ofiolita del material sobre el que ésta cabalga. Estas rocas metamórficas se formaron en una zona donde la temperatura era máxima (unos 600 grados centígrados), inmediatamente contigua a la ofiolita suprayacente. La temperatura disminuía rápidamente con la profundidad, de manera que a sólo unos centenares de metros por debajo del techo de la zona las rocas no están ya metamorfizadas. Aquí el agente metamórfico probable será una combinación del calor que emana de la laja cabalgante de corteza oceánica y del calor de rozamiento generado por el descenso de la placa que experimenta subducción. En estos casos, la mejor explicación de los conjuntos de minerales metamórficos y su disposición es la subducción continua de una placa.

En muchas ofiolitas poco deformadas, las capas de rocas que están correlacionadas con las capas oceánicas identificadas por velocidades de ondas sísmicas son notablemente más delgadas que las oceánicas. Ello ha inducido a postular que las ofiolitas representan una corteza oceánica más delgada de lo normal, generada en dorsales menores de mares marginales pequeños. Se ha dicho que una corteza delgada de este tipo resultaría más fácil de obducir. En efecto, Julian Pearce y otros han demostrado que en los basaltos ofiolíticos hay características geoquímicas cuya presencia resulta perfectamente compatible con la idea de que procedan de una masa fundida provista de cierto contenido en agua, que provendría de una zona de subducción subyacente. Además, la edad de una ofiolita y la fecha de su emplazamiento suelen ser muy próximas, por cuya razón se ha sugerido que la corteza oceánica recién formada quedaría emplazada como ofiolita antes de que la cinta transportadora del proceso de subducción se sumergiera demasiado. Lo que explicaría asimismo la delgadez de una capa ofiolítica.

Pero hay otros factores que no encajan en este modelo sencillo. No cabe duda de que la mayoría de ofiolitas están en contacto con rocas subyacentes de origen continental. En algunos casos puede demostrarse que se trata de fragmentos de corteza oceánica desplazados sobre las rocas continentales. Un ejemplo clásico es el del emplazamiento de la ofiolita de Papúa-Nueva Guinea, que, según ha descrito Hugh L. Davies, del Servicio Australiano de Recursos Minerales, Geología y Geofísica, se ha emplazado en el sur, a lo largo de una zona de cabalgamiento inclinada hacia el norte. A diferencia de lo que ocurre en las demás zonas que rodean el Pacífico, ésta se halla inclinada hacia el lado oceánico; se trata de uno de los contados casos en que el término obducción puede resultar apropiado.

En otras situaciones, bloques de corteza oceánica, a menudo de muchos kilómetros de diámetro, se encuentran en una mezcla tectónica, englobados en una matriz de serpentinita o de sedimento fangoso. Parece entonces más verosímil que los bloques de corteza oceánica se hayan desprendido cuando la placa oceánica se arqueó y fracturó antes de subducir. Los bloques despegados en el proceso habrían caído en una fosa oceánica profunda contigua. Estas fosas son el principal indicio en superficie de la existencia de una zona de subducción.

El término "obducción" induce, pues, a confusión. Con todo, es útil si no se olvidan las complejidades implicadas. Lo que tal vez haga más al caso es que en el actual ciclo de la tectónica de placas (hubo otros ciclos en el pasado) el lugar donde abundan más las ofiolitas son las zonas de subducción o sus aledaños. Por eso su presencia puede tomarse como indicador de la proximidad de márgenes destructivos fósiles. Robert Coleman, John Dewey y Alan Gilbert Smith, entre otros, han aplicado con éxito esta asociación en reconstrucciones geológicas de terrenos del Mesozoico y Paleozoico inferior.

El propio término "ofiolita" resulta bastante forzado para designar fragmentos de corteza oceánica hoy emplazados en tierras emergidas. El término ha visto cambiar su significado. Antes de la aparición de la tectónica de placas, los geólogos asociaban las ofiolitas a las fases iniciales de desarrollo de un geosinclinal; consistía principalmente en serpentinita y se habría metamorfizado en el transcurso de un ciclo de formación de montañas. El macizo de Troodos no presenta ninguna de estas características y, en el decenio de 1950, cuando por vez primera se empezó a estudiar detalladamente, ni siquiera se pensó en las ofiolitas. Luego, a principios de los años 70, se hizo patente que existía un número lo bastante nutrido de estructuras similares al macizo de Troodos que merecían una designación colectiva. Muchos de los complejos a los que ya se calificaba de ofiolitas revelaron, al reexaminarlos, la misma estructura; por eso era quizás inevitable mantener el nombre de ofiolita. De todos modos, al término se le imprimió un significado nuevo y mucho más preciso. Hoy la mayoría de los geólogos aceptan que las ofiolitas son fragmentos de corteza oceánica formados en dorsales o prominencias oceánicas que afloran emergidos, y con este consenso el tiempo parece jugar a favor de la aceptación del término ofiolita, por inapropiado que pueda parecer.


DIALOGO
di
GALILEO GALILEI LINCEO
AL SER.mo FERD. II. GRAN. DUCA DI
TOSCANA
Stefan. Della Bella. F.

El caso Galileo

Al intentar probar que la Tierra gira alrededor del Sol, Galileo adoptó un modo de razonar que no sólo llevó a que la Iglesia le procesara, sino también a la nueva metodología científica de contrastación de hipótesis

Owen Gingerich

Las dificultades de Galileo con la Iglesia católica, que acabaron en su proceso y consiguiente humillación, se suelen describir como una confrontación entre la ciencia empírica y el dogmatismo ciego. A pesar de su abjuración, no hay duda que Galileo creía que el sistema heliocéntrico copernicano era cierto. Hoy, una vez firmemente establecido el Sol como centro del sistema planetario, es fácil afirmar que la razón estaba de parte de Galileo y que la Iglesia estaba equivocada. Pero en tiempos de Galileo las opiniones y pareceres estaban lejos de ser tan obvios o evidentes.

Galileo defendió el sistema copernicano con una serie de argumentos ingeniosos y originales que en gran parte se basaban en sus recientes observaciones con el telescopio. Desde un punto de vista moderno la defensa de Galileo parece imponerse de inmediato, pero cuando presentó sus ideas no había aún ninguna prueba observacional de la nueva cosmología, y hasta el propio Galileo hacía notar que nunca admiraría lo suficiente a aquellos que habían adoptado el sistema heliocéntrico en contra de la evidencia de los sentidos. Para los criterios de la época, su razonamiento no sólo se oponía a la Iglesia tradicional, sino que también dejaba mucho que desear desde un punto de vista lógico. Yo diría que Galileo estaba infringiendo las reglas admitidas de la ciencia, pero que al hacerlo creó unas nuevas reglas, que han sido aceptadas desde entonces.

El desenlace del caso Galileo, en el que la Iglesia ganó la batalla pero perdió la guerra, tuvo consecuencias históricas importantes, entre las que cabe destacar el desplazamiento de la actividad científica hacia los países protestantes del norte. Trescientos cincuenta años después, en un momento en que algunos vuelven a proclamar los derechos de la religión a hacer ciertas afirmaciones cosmológicas, el caso Galileo tiene todavía mucho que decir acerca de la práctica de la ciencia y de su filosofía. Estaba en juego tanto la verdad de la naturaleza como la naturaleza de la verdad.

Para comprender el caso Galileo es necesario recordar a grandes rasgos cómo se introdujo la cosmología copernicana algunos decenios antes. Cuando por fin se publicó en 1543 la obra magna de Copérnico, *De revolutionibus orbium coelestium (Sobre las revoluciones de los orbes celestes),* no se podía aducir en favor de su sistema ni una sola prueba observacional inequívoca. El logro de Copérnico había sido fruto de la mente. Había reparado en que, reordenando las órbitas de los planetas de forma que el Sol estuviera próximo a su centro, aparecía una sorprendente regularidad. El planeta más rápido, Mercurio, tenía la órbita más cercana al Sol; el planeta más lento, Saturno, la más alejada; y también se ordenaban según sus períodos los planetas entre ambos. El esquema ofrecía una explicación natural de algunas observaciones que no la tenían en las teorías anteriores, como, por ejemplo, la geometría del arco retrógrado de cada planeta (el segmento de la órbita en el que parece que el planeta invierte el sentido de su marcha). Sin embargo, este poder explicativo tenía unos costes muy altos: lanzaba a la Tierra a un vuelo vertiginoso alrededor del Sol, teniendo que arrastrar de alguna manera a la Luna en ese giro. Todo este modelo era ridículo en el marco heredado y admitido de la física aristotélica. "Todo se ha venido abajo, ya no hay coherencia", se lamentaba algo más tarde John Donne. Y la coherencia es la niña mimada de la ciencia y la piedra de toque que permite rechazar las teorías poco firmes.

Con el fin de dar a conocer el punto de vista de la comunidad de astrónomos unos cincuenta años después de la publicación del *De revolutionibus,* me propongo describir un imaginario congreso de la Unión Astronómica Internacional celebrado en 1592. El vicepresidente, C. Clavio, de Roma, se ha levantado para alabar la exposición del presidente, Tycho Brahe, de Dinamarca. Tycho acababa de introducir otro sistema cosmológico intermedio: los planetas giran entorno al Sol, pero éste y los planetas que le acompañan giran alrededor de una Tierra inmóvil. Clavio hace ver que el sistema de Tycho conserva admirablemente las relaciones que había descubierto Copérnico en la disposición armoniosa de los planetas y ofrece una explicación tan natural de los movimientos retrógrados como la que ofrecía la hipótesis copernicana. Como había dicho el propio Tycho la disposición de Copérnico no contravenía en lo más mínimo los principios de la matemática, pero dotaba a la Tierra (este cuerpo perezoso, tardo y no apto para moverse) de un movimiento tan veloz como el de los planetas etéreos. El sistema de Tycho salva con brillantez la física tradicional, al mantener a la Tierra en reposo, y no entra en contradicción con textos bíblicos, como el salmo 104: "¡Dios mío, qué grande eres!.. Tú asentaste la Tierra, inconmovible para siempre jamás".

DISPUTA COSMOLÓGICA representada en el frontispicio del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* de Galileo, impreso en la ciudad de Florencia en el año de 1632. Los tres personajes son: Aristóteles *(izquierda),* Ptolomeo *(centro),* que porta un modelo de esferas geocéntricas, y Copérnico *(derecha),* que lleva un emblema de su propia teoría heliocéntrica. En conversaciones con el Papa Urbano VIII, Galileo se había comprometido a escribir una exposición neutral del sistema ptolomeico y del copernicano, pero el *Diálogo* distaba mucho de ser imparcial. La defensa sostenida por Galileo de la cosmología heliocéntrica terminó en un proceso de la Sagrada Congregación de la Inquisición. El estandarte lleva la dedicatoria del *Diálogo* a Fernando II de Medici, Gran Duque de Toscana. El término "Linceo" identifica a Galileo como miembro de la Academia de los Linceos, sociedad científica formada en 1603.

REVOLVTIONVM LIB. I. 10

hac ordinatione admirandam mundi symmetriam, ac certũ harmoniæ nexum motus & magnitudinis orbium: qualis alio modo reperiri non potest. Hic enim licet animaduertere, non segniter contemplanti, cur maior in Ioue progressus & regressus appareat, quàm in Saturno, & minor quàm in Marte: ac rursus maior in Venere quàm in Mercurio. Quod'q; frequentior appareat in Saturno talis reciprocatio, quàm in Ioue: rarior adhuc in Marte, & in Venere, quàm in Mercurio. Præterea quòd Saturnus, Iupiter, & Mars acronycti propinquiores sint terræ, quàm circa eorũ occultationem & apparitionem. Maxime uero Mars pernox factus magnitudine Iouem æquare uidetur, colore duntaxat rutilo discretus: illic autem uix inter secundæ magnitudinis stellas inuenitur, sedula obseruatione sectantibus cognitus. Quæ omnia ex eadem causa procedũt, quæ in telluris est motu. Quòd autem nihil eorum apparet in fixis, immensam illorum arguit celsitudinem, quæ faciat etiam annui motus orbem siue eius imaginem ab oculis euanescere. Quoniam omne uisibile longitudinem distantiæ habet aliquam, ultra quam non amplius spectatur, ut demonstratur in Opticis. Quòd enim à supremo errantium Saturno ad fixarum sphæram adhuc plurimum intersit, scintillantia illorum lumina demonstrant. Quo indicio maxime discernũtur à planetis, quodq; inter mota & non mota, maximam oportebat esse differentiam. ~~Tanta nimirum est diuina hæc Opt. Max. fabrica.~~

~~De triplici motu telluris demonstratio.~~ Cap. XI.

De hypothesi triplicis motus terræ, eiusque demonstratione.

CVm igitur mobilitati terrenæ tot tantaq; errantium syderũ consentiant testimonia, iam ipsum motum in summa exponemus, quatenus apparentia per ipsum tanquam hypotesim demonstrentur, quem triplicem omnino oportet admittere. Primum quem diximus νυχθημέρινον à Græcis uocari, diei noctisq; circuitum proprium, circa axem telluris, ab occasu in ortum uergentem, prout in diuersum mundus ferri putatur, æquinoctialem circulum describendo, quem nonnulli æquidialem dicunt, imitantes significationem Græcorum, apud

c ij quos

ALGUNOS PASAJES CENSURADOS del *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico. Las modificaciones los hacen meramente hipotéticos con lo que la Iglesia podía admitir la cosmología heliocéntrica. Estas correcciones son del ejemplar de Galileo y las había hecho él mismo. Siguiendo las instrucciones de la Sagrada Congregación del Indice, Galileo tachó la última frase del capítulo 10, que decía: "Tan grande es, sin duda, la obra divina del todopoderoso". Cambió también el título del capítulo siguiente, que pasó de "Sobre la explicación del triple movimiento de la Tierra" a "Sobre la hipótesis del triple movimiento de la Tierra y su explicación". La decisión de sólo censurar el *De revolutionibus* y no condenarlo se tomó en 1616, en parte por la presión del cardenal Maffeo Barberini, que subiría más tarde al trono pontificio con el nombre de Urbano VIII. Ese mismo año se le avisó a Galileo que no se expresara con demasiada vehemencia en favor del sistema copernicano, si bien oficialmente no se le prohibió enseñarlo.

Un sondeo informal entre los delegados revela una cierta división de opiniones: aproximadamente la mitad aceptan la opinión de Tycho, pero los demás sostienen que la elección de sistemas es irrelevante, ya que todos esos modelos geométricos no son sino hipotéticos. Algunos de los que adoptan esta última postura citan el prefacio anónimo (atribuido a Andreas Osiander) al libro de Copérnico: "que nadie espere nada cierto de la astronomía... no sea que... salga de este estudio más ignorante de lo que entró". Menos del diez por ciento apoyaban al astrónomo siciliano Francesco Maurolico que decía que Copérnico merecía unos azotes. La inmensa mayoría prefería las tablas de Copérnico para calcular las posiciones de los planetas, pero ello no suponía comprometerse con la cosmología heliocéntrica, dado que las tablas se habían compuesto con independencia de cualquier ordenación determinada de los planetas.

Aunque al jesuita Clavio y al luterano Tycho les une una gran amistad, las tensiones internacionales son patentes. Michael Maestlin, de Tübingen, proclama a los cuatro vientos sus críticas al nuevo calendario de Clavio. Maestlin está también picado porque su estudiante Johannes Kepler, que ha podido asistir gracias a una ayuda para jóvenes astrónomos, no comparte su opinión de que el calendario gregoriano es obra del diablo. Por lo que se refiere a Galileo Galilei, un profesor interino de matemáticas en Pisa de 27 años de edad, ningún miembro del congreso ha oído hablar de él.

Casi unos cuatrocientos años después, millones de personas, que no saben quiénes fueron Tycho, Clavio, Maestlin o Kepler, conocen el nombre de Galileo. La prominencia de Galileo se debe a sus importantes contribuciones a la física y a la astronomía, pero su fama se vio, sin duda, incrementada por el proceso de la Inquisición. En atinada expresión del físico del siglo diecinueve David Brewster, Galileo se convirtió en un "mártir de la ciencia". Hoy, casi trescientos cincuenta años después de su proceso y abjuración, el mismo Vaticano se ha propuesto volver a abrir el caso.

A veces se presenta la condena de Galileo como si hubiera sido un proceso por herejía. Hablando estrictamente, el sistema copernicano nunca fue condenado oficialmente como herético, ni tampoco Galileo fue condenado por herejía. El juez que se ocupó del caso acusó a éste de "vehemente sospecha

de herejía". Tuvo también en cuenta que eran muchos los teólogos que opinaban que se debía considerar herético el sistema copernicano, pero ésta no llegó a ser nunca la posición oficial de la Iglesia. Para comprender estas posturas es necesario examinar tanto las circunstancias históricas del proceso como lo que filosóficamente estaba en juego.

Al final del siglo dieciséis no había todavía ninguna razón que impusiera la teoría copernicana como una imagen física del universo. Todos los astrónomos conocían bien la teoría en sus rasgos esenciales, pero muy pocos pensaban que describiera el mundo real. Era opinión ampliamente compartida que la verdad no se encontraba en la astronomía sino en la Biblia. El Libro de la Escritura, dictado a la letra por Dios, gozaba de una situación privilegiada. El propio Galileo aceptaba esta doctrina sin titubear. Sin embargo, no por eso sostenía necesariamente que el itinerario intelectual hacia la verdad pasara sólo por la parcela de los teólogos. Argüía que el Libro de la Escritura podía ser ambiguo, mientras que el Libro divino de la Naturaleza podía ser probado y contrastado. Concedía que la Biblia tenía su lugar, pero creía también que la Biblia enseñaba cómo ir al cielo, pero no cómo va el cielo.

¿Cómo *va* de hecho el cielo y qué revela el Libro de la Naturaleza acerca de su movimiento? Una respuesta desenfadada podría ser: observemos con el telescopio. El telescopio produjo en Galileo un impacto psicológico enorme. Durante años había sido, a lo sumo, un copernicano tímido o incluso hasta indiferente, y a sus estudiantes de Pisa (o más tarde, de Padua) les había enseñado los argumentos habituales en favor de una Tierra inmóvil y centro del universo. Mas en el otoño de 1609, provisto de un tubo óptico que él mismo había construido (un *perspicillum,* como él lo llamaba), lo enfocó al cielo y quedó asombrado de lo que vio. A los pocos meses estaba en prensa un libro suyo en el que daba cuenta de sus observaciones: *Sidereus nuncius (El mensajero sideral).* Hablaba de montañas en la Luna y mencionaba estrellas y satélites hasta entonces desconocidos. La Luna era semejante a la Tierra y no el globo etéreo de puro cristal que habían imaginado sus predecesores. La Vía Láctea parecía ser un conglomerado de innumerables estrellas. Y lo más sorprendente de todo: cuatro astros acompañaban a Júpiter en su desplazamiento. Galileo los llamó astutamente los Planetas Medíceos con la esperanza de obtener un puesto en la corte del Gran Duque Cósimo II de Medici.

Las observaciones de Galileo con el telescopio puede que excitaran su complacencia, pero la exposición que ofrece en el *Sidereus nuncius* no presenta ninguna prueba inequívoca de que hubiera adoptado el sistema copernicano. Sin embargo, apenas el libro había salido de prensas, cuando descubrió algo extraordinario que de un golpe falsaba el sistema ptolomeico: las fases de Venus.

Cuando Galileo había estado haciendo sus sorprendentes descubrimientos a finales de 1609 y comienzos de 1610, Venus estaba demasiado próxima al Sol para poderla observar. Avanzado el verano, un antiguo alumno suyo, Benedetto Castelli, le hizo notar a Galileo que en el sistema copernicano Venus debería mostrar toda la serie completa de fases: desde un disco oscuro, pasando por el cuarto creciente y la forma convexa, hasta la forma llena, totalmente iluminada. En el sistema ptolomeico, por el contrario, el epiciclo de Venus está encerrado entre la Tierra y el Sol y, por tanto, Venus sólo muestra fases crecientes; no pasa nunca por detrás del Sol y no se nos puede mostrar plenamente iluminada.

Hasta octubre no dirigió Galileo su perspicillum hacia Venus, que en ese momento estaba en su fase convexa. A primeros de diciembre, cuando el planeta había disminuido hasta una diminuta media luna, adelantaba su descubrimiento en un anagrama: "Haec immatura a me iam frustra leguntur o.y." ("Por el momento estas materias son excesivamente recientes para poderlas interpretar". Las letras "o.y" forman parte de la frase primigenia, pero no encajan en el anagrama.) Sin duda eligió esta forma velada de darlo a conocer para tener tiempo de estar seguro de su descubrimiento; Venus podría hallarse siempre detrás del Sol, en cuyo caso volvería a otra fase convexa. Con esta estratagema Galileo salvaguardaba también la prioridad del descubrimiento; puesto que había sido Castelli el primero en mencionar esta posibilidad, otros podían haber estado muy cerca de hacer el mismo descubrimiento.

Galileo fue subiendo puestos en la escala social envuelto siempre en polémicas. Sus descubrimientos le habían granjeado un nuevo empleo de matemático en la corte de los Medici, y le habían llevado a la fama que tanto ansiaba. La fama, a su vez, implicaba un cierto poder, el poder quizá de persuadir a toda la jerarquía católica para que adoptara el sistema copernicano. Al menos Galileo estaba lo suficientemente pagado de sí como para esperar que les persuadiría.

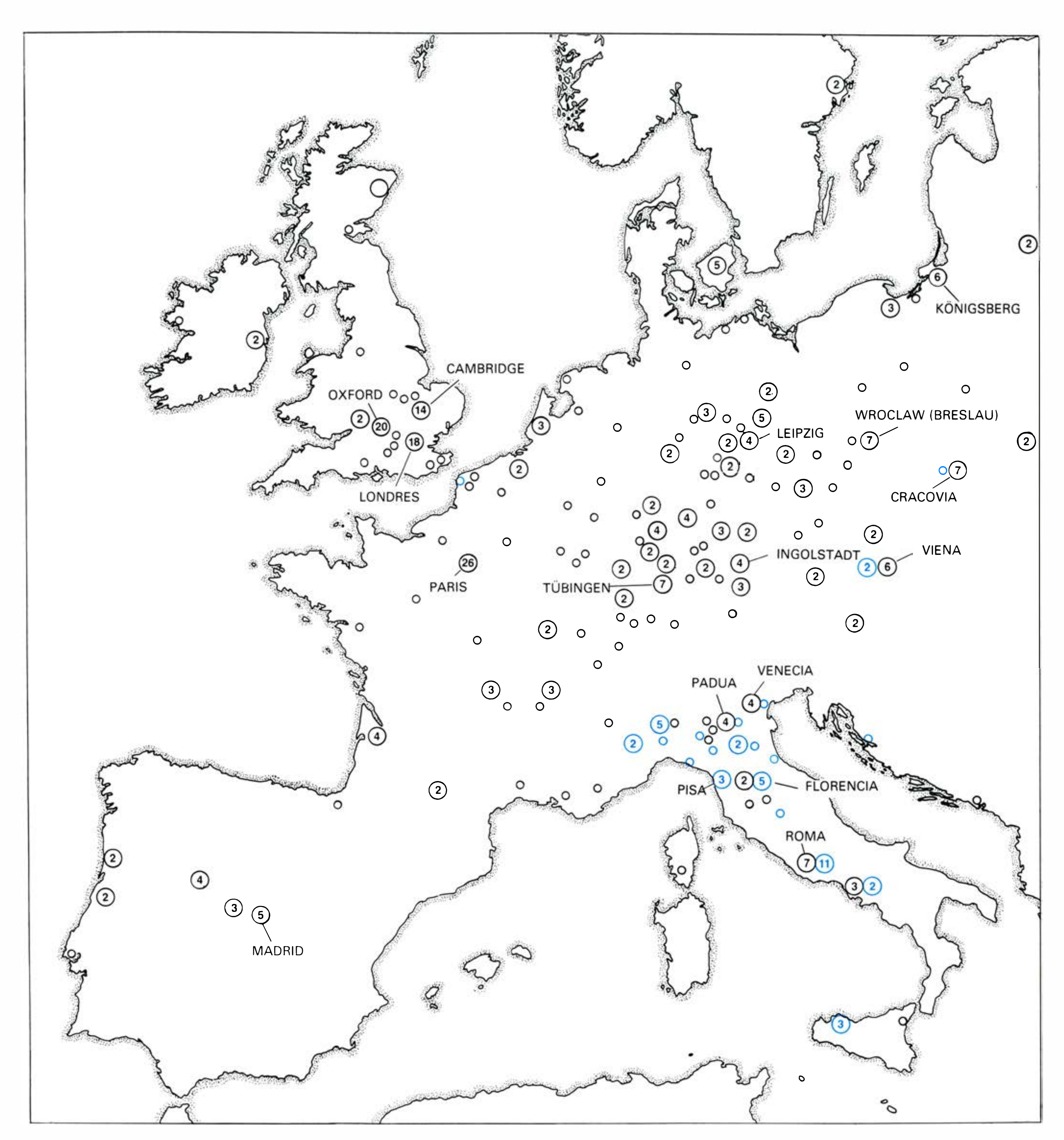
En su precipitación por dejar asentada su prioridad, Galileo fue a veces más agresivo de lo que la prudencia parecía recomendar. Se enzarzó en una disputa con el jesuita C. Scheiner sobre cuál de los dos había sido el primero en descubrir las manchas solares. Además, Scheiner prefería creer que el Sol era impoluto y que las manchas eran nubes que se interponían. Galileo probó lo contrario, exhibiendo cierta mordacidad contra Scheiner. Giorgio de Santillana insinúa en su libro, *El crimen de Galileo*, que Scheiner no le perdonó nunca y que, años más tarde, encabezó la venganza de los jesuitas. Cierto que Scheiner estaba en Roma cuando tuvo lugar el proceso de Galileo, pero no hay ninguna prueba de que tuviera algo que ver con tales maquinaciones.

Por Año Nuevo de 1611, precisamente cuando Venus había redondeado su elongación occidental, empezó a aparecer la fase creciente y Galileo descifró su anagrama a Kepler: "Cynthiae figuras aemulatur mater amorum" ("La madre del amor imita las figuras de Cintia"), o, en otras palabras, Venus tiene las mismas fases que la Luna. Cuando Galileo comprendió que las fases observadas de Venus eran incompatibles con el sistema ptolomeico, no pudo dejar de advertir que, de hecho, el Libro de la Naturaleza estaba diciendo algo sobre cómo va el cielo. Descartado el sistema ptolomeico, Galileo dio su apoyo al sistema copernicano, prescindiendo del apaño de Tycho.

Durante un almuerzo con Cósimo de Medici y su viuda madre, la Gran Duquesa Cristina de Lorena, se entabló una discusión sobre la realidad de los satélites de Júpiter. Galileo no estaba presente, pero sí Castelli. Castelli, que por influencia de Galileo acababa de ser nombrado profesor de matemáticas en Pisa, se enzarzó en una animada discusión con Cristina sobre si hay conflicto entre la Biblia y la teoría heliocéntrica. Resultado directo del debate fue el reto que se le hizo a Galileo para que defendiera su punto de vista de que el Libro de las Escrituras no pone ninguna objeción insuperable al sistema copernicano. Galileo redactó un análisis convincente que incluía el brillante epigrama sobre que la Biblia enseña cómo ir al cielo, pero no cómo van los cielos. (En realidad, Galileo había tomado el dicho del cardenal César Baronio, bibliotecario del Vaticano.)

Pero una cosa era hacer ver que la ordenación heliocéntrica es compatible con el Libro de la Escritura y otra muy distinta probar que el Libro de la Naturaleza habla inequívocamente en favor de Copérnico. Para comprender esta parte de la controversia es necesario recordar las dos formas de la lógica aristotélica: inducción y deducción.

La inducción es el proceso por el que el pensamiento llega a conclusiones generales a partir de casos particulares; creo que es el proceso básico de aprendizaje. Fijémonos, por ejemplo, en la reproducción de las aves: las gallinas ponen huevos, los petirrojos ponen huevos, las avestruces ponen huevos, etc. etc., y, por tanto, generalizamos afirmando que todas las aves son ovíparas, todas ponen huevos. Sin embargo, no hemos probado la conclusión, pues cabe la posibilidad de que se dé un contraejemplo. Por este motivo el razonamiento inductivo no puede conducir a una verdad indudable; algo que sabían todos los filósofos escolásticos coetáneos de Galileo.



LA DISTRIBUCION PROBABLE de los ejemplares censurados del *De revolutionibus orbium coelestium* de Nicolás Copérnico en 1620 hace pensar que la eficacia del decreto de 1616 se limitó fundamentalmente a Italia; es evidente que el decreto no se urgió ni siquiera en otros países católicos, como por ejemplo España. Los círculos en rojo representan ejemplares censurados y los círculos negros los no censurados. El número indica la cantidad de ejemplares que había en un mismo lugar. Se ha elaborado el mapa siguiendo la historia de unos 500 ejemplares de las dos primeras ediciones. Probablemente había otros 500 ejemplares con una distribución semejante a la de los aproximadamente 380 libros cuyas localizaciones se dan en el mapa aquí ilustrado.

La deducción es diferente. Dadas unas premisas verdaderas, la conclusión alcanzada por una deducción válida ha de ser necesariamente verdadera. Sea el silogismo:

A. Si llueve, las calles están mojadas.
B. Llueve.
C. Por tanto, las calles están mojadas.

Fijémonos ahora en este otro, en el que se han intercambiado *B* y *C:*

A. Si llueve, las calles están mojadas.
B. Las calles están mojadas.
C. Por tanto, llueve.

Quien tenga unos rudimentos de lógica sabe que este segundo esquema de razonamiento es una manifiesta falacia. Pues las calles podrían estar mojadas por otras razones: por haberse fundido la nieve; porque la sección municipal de limpieza de calles cumple mejor su cometido; o porque un regimiento de caballería ha pasado por el lugar.

¿Cómo se aplica este análisis a la defensa que del copernicanismo hizo Galileo? Consideremos este silogismo:

A. Si el sistema planetario es heliocéntrico, Venus muestra fases.
B. El sistema planetario es heliocéntrico.
C. Por consiguiente, Venus muestra fases.

Esquema deductivo válido; pero no era ésta la forma que tenía la argumentación de Galileo. Este intercambió la segunda premisa y la conclusión:

A. Si el sistema planetario es heliocéntrico, Venus muestra fases.
B. Venus muestra fases.
C. Por consiguiente, el sistema planetario es heliocéntrico.

Es evidente que Galileo había cometido un fallo garrafal de lógica elemental, que el propio Kepler le echó en cara. Podía haber otras muchas explicaciones de las fases observadas de Venus; por poner un caso, el sistema de Tycho también las predecía.

Cuando la "Carta de Galileo a Cristina" circuló y se difundió por Roma en 1616 provocó esta respuesta del cardenal Roberto Bellarmino, cabeza de los teólogos católicos del momento, quien escribía a otro copernicano, el padre Paolo Antonio Foscarini, lo siguiente:

"Con sumo gusto he leído la carta en italiano y el ensayo en latín que Vuestra Reverencia me ha enviado, por lo que le estoy muy agradecido; y confieso que ambos escritos están llenos de ingenio y de enseñanzas. Mas, puesto que me pide mi opinión, se la expondré en pocas palabras, dado que Vd. dispone ahora de poco tiempo para leer y yo poco para escribir.

"Primero. Digo que V.ª R.ª y el señor Galileo obran prudentemente al contentarse con hablar hipotéticamente [*ex suppositione*] y no absolutamente, como siempre he creído que había hablado Copérnico. Pues decir que, supuesto que la Tierra se mueve y que el Sol está quieto, se salvan mejor todas las apariencias que con las excéntricas y los epiciclos es expresarse correctísimamente, y no encierra ningún peligro; y al matemático le basta. Pero querer afirmar que el Sol está realmente inmóvil en el centro del mundo... y que la Tierra se halla en la tercera esfera y gira muy rápidamente alrededor del Sol encierra un gran riesgo no sólo de irritar a todos los filósofos y teólogos escolásticos, sino también de dañar nuestra sagrada fe al hacer falsas a las Sagradas Escrituras. V.ª R.ª ha hecho ver que hay muchas formas de exponer la Biblia, pero no las ha aplicado en particular, y, sin duda, habría encontrado enormes dificultades si hubiera intentado explicar todos los pasajes que ha citado. ...

"Tercero. Digo que si hubiera una verdadera demostración de que el Sol está en el centro del mundo y la Tierra en la tercera esfera y de que no es el Sol el que gira alrededor de la Tierra sino ésta entorno al Sol, entonces sería necesario andar con mucho tiento al explicar aquellos pasajes de la Escritura que parecen contrarios, y decir más bien que no lo entendemos que decir que algo es falso. Pero no creeré que se dé tal demostración hasta que no se me presente. Y no es lo mismo demostrar que, supuesto que el Sol está quieto en el centro y la Tierra en el cielo, se salvan las apariencias que demostrar que en verdad el Sol está inmóvil en el centro y la Tierra en el cielo. Creo que puede que se dé la primera demostración, pero tengo muy serias dudas sobre la existencia de la segunda. ..."

Galileo sabía que no podía establecer lógicamente, por deducción, el sistema copernicano, pero la situación no era tan sencilla. El sistema copernicano no sólo predecía las fases de Venus, sino que era un modelo que explicaba también otras muchas cosas. Si la Tierra era un planeta, los otros planetas podrían ser semejantes a la Tierra, y de hecho la Luna parecía serlo cuando la miraba con su telescopio. El sistema copernicano ordenaba los planetas según sus períodos; e igualmente, cuando el telescopio reveló los satélites de Júpiter, se vio también que se ordenaban según sus períodos, como si fuera un sistema solar en miniatura.

La forma de razonar de Galileo era semejante a la inducción, sólo que más refinada. Era un inicio de lo que ahora llamamos método hipotético-deductivo: la contrastación de un modelo hipotético que, a medida que va superando con éxito cada prueba, adquiere una verosimilitud más convincente. En nuestros días no es la palabra "verdad", sino la palabra "modelo" la que engalana las páginas de las revistas científicas.

Por lo que a los teólogos se refería, el punto en litigio no era, en realidad, el sistema copernicano. No me cansaré de repetirlo, porque es un punto que nunca se recalca lo suficiente. El campo de batalla era el método mismo, el camino que lleva al conocimiento seguro del mundo, la cuestión de si el Libro de la Naturaleza podía rivalizar de alguna manera con el Libro inerrante de la Escritura como avenida hacia la verdad. En opinión del cardenal Bellarmino y de otros teólogos católicos, el proceder de Galileo era esencialmente inductivo y, por consiguiente, no excluía la posibilidad de error. Esos argumentos contingentes eran insuficientes para forzar una reinterpretación de la Escritura que podría erosionar la inerrancia de la Biblia.

Para estar completamente seguros de que se evitaba la confusión en las mentes populares (en especial porque los problemas de la interpretación de las Escrituras eran centrales en la confrontación con los protestantes), a las autoridades eclesiásticas les pareció prudente condenar la teoría copernicana. El primer paso fue conocer la opinión de los teólogos sobre estas dos proposiciones distintas: 1) la inmovilidad del Sol, 2) la movilidad de la Tierra. El informe, que esencialmente era un documento interno, decía que la proposición sobre la inmovilidad del Sol era disparatada y formalmente herética porque contravenía el sentido literal de la Escritura, pero que la proposición sobre la movilidad de la Tierra era simplemente errónea. El problema, pues, era qué se hacía con el informe. Se pensó en dos acciones coordinadas: contener y controlar a Galileo, e incluir al *De revolutionibus* en el Indice de libros prohibidos.

Mas esta última medida implicaba algunos inconvenientes prácticos. Se consideraba al libro de Copérnico como

Nos, Roberto Cardenal Bellarmino, habiendo oído que se propala la calumnia de que el señor Galileo Galilei ha abjurado en nuestra presencia y que se le ha impuesto una penitencia saludable, y habiendo sido requerido para manifestar la verdad, declaramos que el susodicho señor Galileo no ha abjurado ni en nuestras manos ni, que nosotros sepamos, en las de ninguna otra persona de Roma o de ningún otro lugar de ninguna opinión o doctrina por él sostenida, ni se le ha impuesto ninguna penitencia saludable; sino que tan sólo se le ha comunicado la declaración hecha por el Santo Padre y promulgada por la Sagrada Congregación del Indice, en la que se da a conocer que la doctrina atribuida a Copérnico que [dice que] la Tierra se mueve alrededor del Sol y que el Sol está inmóvil en el centro del mundo y que no se mueve de oriente a occidente es contraria a las Sagradas Escrituras y, por consiguiente, no se la puede sostener o defender. En fe de lo cual hemos escrito y subscrito la presente de propia mano, el veintiséis de mayo de 1616.

una contribución importante a la reforma de la astronomía, de la que dependía el calendario y la determinación precisa de la Pascua. Atendiendo a estas circunstancias, la Sagrada Congregación del Indice decidió no proscribir el libro sino expurgarlo y corregir algunos pasajes.

Algo de estas deliberaciones ha llegado hasta nosotros por los chismes recogidos en el diario de Giovanfrancesco Buonamici, un secretario diplomático oriundo de la Toscana de Galileo. Buonamici escribía que "el Papa Paulo V era de la opinión de declarar a Copérnico contrario a la fe; pero los cardenales Bonifacio Caetani y Maffeo Barberini se opusieron abiertamente al Papa y lograron parar la medida con las buenas razones que adujeron". Los dos cardenales eran personajes centrales en la controversia cosmológica. Barberini había de desempeñar más tarde un papel más relevante en la vida de Galileo, y a Caetani se debe la sugerencia de censurar el *De revolutionibus*.

En opinión de Caetani, la teoría copernicana era falsa y opuesta a la Escritura, pero no herética. Esto puede parecer hoy una distinción sutil e irrelevante, pero ciertamente no lo era en el siglo diecisiete. Las instrucciones para la censura rezaban:

"Si algunos pasajes de Copérnico sobre el movimiento de la Tierra no son hipotéticos, conviértaselos en tales; y así no serán opuestos a la verdad ni a la Sagrada Escritura. Al contrario, en cierto sentido estarán de acuerdo con ellas debido a la naturaleza incierta de las suposiciones, que el estudio de la astronomía suele emplear como un derecho peculiar".

Precisamente cuando la Sagrada Congregación del Indice estaba actuando contra el libro de Copérnico, Galileo estaba en Roma tratando por todos los medios de ganar adeptos para el sistema heliocéntrico. Parece que estaba convencido de que él solo podría mover a los dirigentes católicos en pro de su postura. De hecho, tenía en Roma poderosos amigos que simpatizaban con sus ideas, incluso entre los eclesiásticos, pero las fuerzas conservadoras tenían también mucha fuerza, y entre ellas se contaba el Papa Paulo V.

Mientras Galileo estaba en Roma se

CARTA A GALILEO del cardenal Roberto Bellarmino que precisa qué clase de advertencia se le dio a Galileo en 1616. Arriba el original y en medio la copia de Galileo. Cuando en 1633 la Inquisición insinuó que se le había prohibido escribir sobre la cosmología copernicana, Galileo dio a conocer, primero, su copia y más tarde la carta original. Ambas cartas se encuentran ahora entre los papeles de Galileo en los archivos secretos del Vaticano.

puso en marcha la otra parte de la respuesta papal al informe de los teólogos. Se debía convocar a Galileo ante el cardenal Bellarmino y advertirle que no se pronunciara con excesiva vehemencia en favor del sistema copernicano. El Papa le comunicó a Bellarmino que si Galileo se mostraba obstinado, se le ordenara guardar silencio. Para estar seguros de que se cumplían los deseos del Papa, la entrevista tuvo lugar en presencia de dos frailes dominicos, es decir, de dos miembros de la orden que tenía a su cargo la administración de la Inquisición.

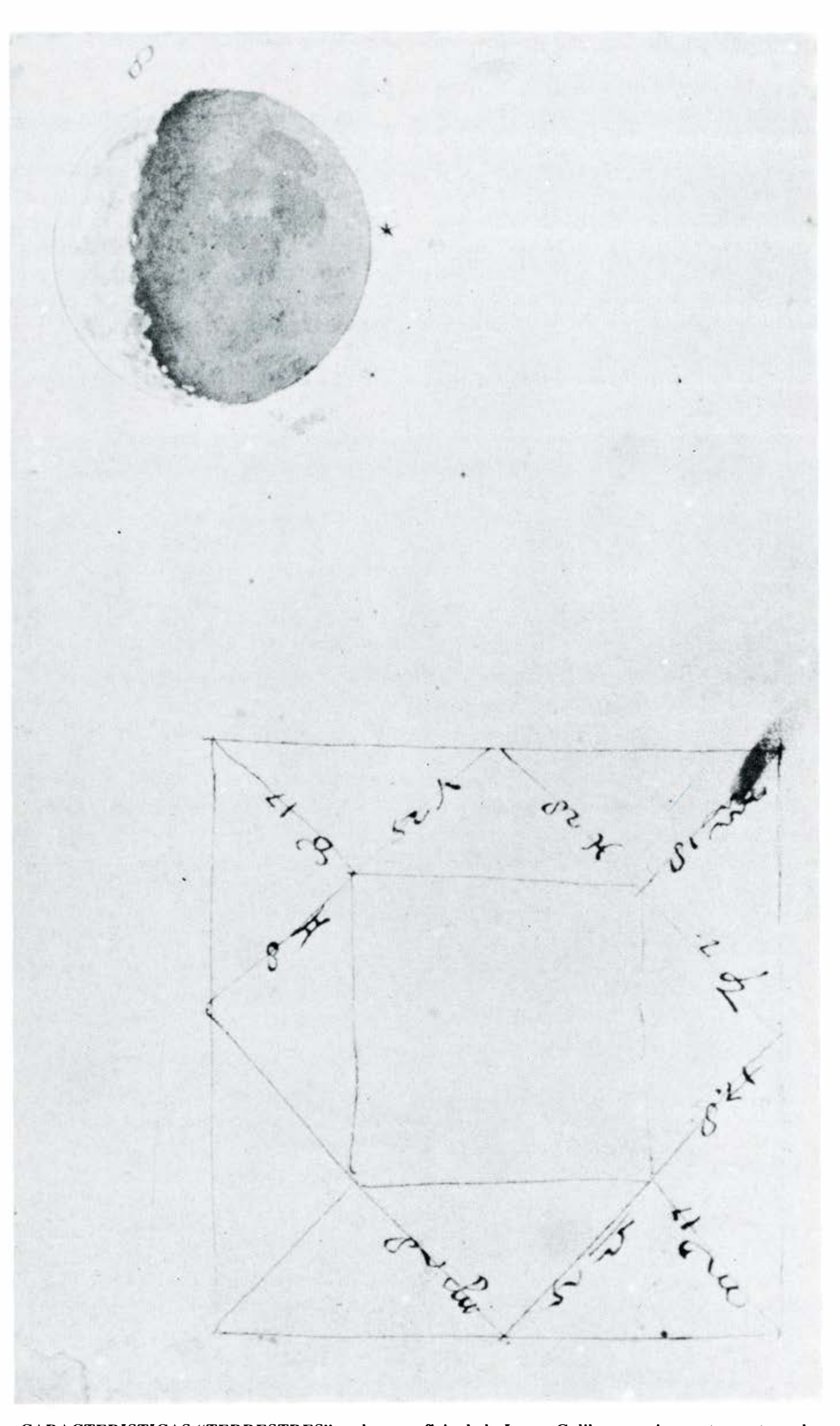
Galileo colaboró aceptando los consejos de Bellarmino. Sin embargo, después de la entrevista empezaron a circular por Roma rumores de que se le había prohibido oficialmente a Galileo enseñar la teoría copernicana. Evidentemente los rumores incomodaron a Galileo, quien solicitó y obtuvo un escrito de Bellarmino en el que éste aseguraba que tal prohibición no había existido. En la carta se decía entre otras cosas:

"Nos, Roberto cardenal Bellarmino, habiendo oído que se propala la calumnia de que el señor Galileo Galilei ha abjurado en nuestra presencia y que se le ha impuesto una sentencia saludable ha sido castigado... declaramos que el señor Galileo no ha abjurado de ninguna opinión o doctrina por él sostenida; ni se le ha impuesto tampoco ninguna penitencia saludable; sino que tan sólo se le ha notificado la declaración hecha por el Santo Padre y promulgada por la Sagrada Congregación del Índice, en la que se da a conocer que la doctrina atribuida a Copérnico... es contraria a las Sagradas Escrituras y, por consiguiente, no se la puede sostener o defender".

En estas condiciones se impuso silencio a Galileo por el momento. Durante siete años se quedó en Florencia y se sujetó al consejo del cardenal Bellarmino. Siguió tan intrigante y vivaz como siempre, pero reservó su minuciosidad agresiva para otras materias, como, por ejemplo, los cometas de 1618. En su libro sobre los cometas *(Il Saggiatore,* o *El Ensayador)* evitó tratar del sistema copernicano, pero incluyó tal cantidad de observaciones acerca de la naturaleza de la ciencia que a veces se ha llamado a este libro su manifiesto científico. Dice, por ejemplo en el parágrafo 6:

"La filosofía está escrita en ese grandioso libro, que está continuamente abierto ante nuestros ojos (lo llamo universo). Pero no se puede descifrar si antes no se comprende el lenguaje y se conocen los caracteres en que está escrito. Está escrito en lenguaje matemático, siendo sus caracteres triángulos, círculos y otras figuras geométricas. ...sin las cuales andamos a tientas en un oscuro laberinto".

Aún no se había acabado de imprimir *Il Saggiatore* cuando llegó una noticia que alegró a todos los católicos liberales. El recién elegido Papa, que tomó el nombre de Urbano VIII, era Maffeo Barberini, uno de los cardenales que habían intervenido para que no se condenara el *De revolutionibus.* Barberini era amigo de las artes y miembro, al



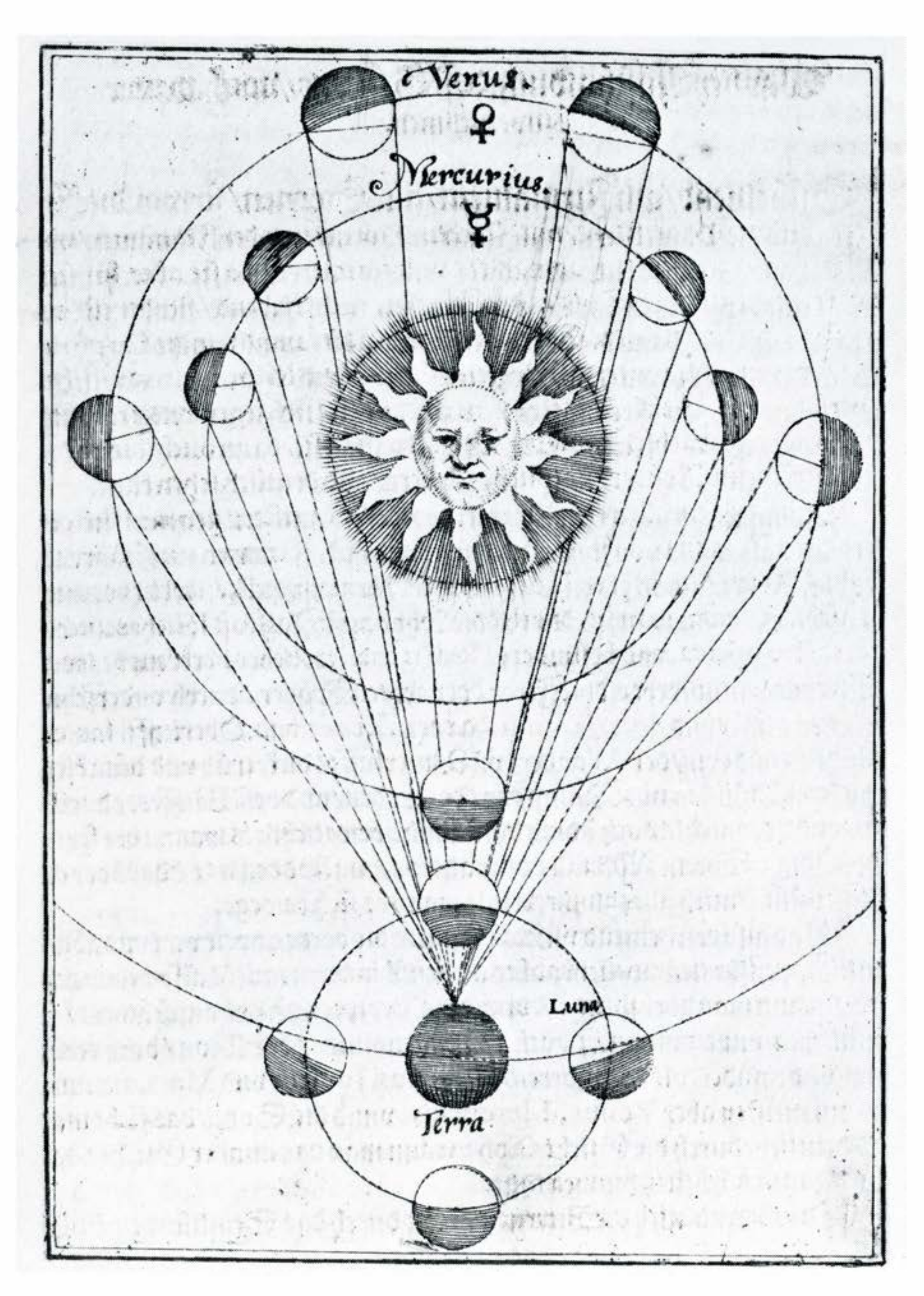
CARACTERISTICAS "TERRESTRES" en la superficie de la Luna. Galileo menciona estas y otras observaciones en apoyo de la teoría heliocéntrica. La existencia de montañas, cráteres y otros "defectos" constituía un indicio de que los cuerpos celestes no eran esencialmente distintos de la Tierra. Por tanto, era razonable suponer que la Tierra era un planeta y no una esfera fija de naturaleza enteramente diferente. El dibujo superior lo hizo el propio Galileo después de haberse construido un telescopio astronómico en 1609. En la misma página se lee el comienzo de un horóscopo para Cósimo II de Medici.

igual que Galileo, de la reducida y selecta Academia de Linceos, una de las primeras sociedades científicas. Los regocijados Linceos aún tuvieron tiempo de cambiar la portada del libro de Galileo y dedicarlo al nuevo Pontífice. Antes del año Galileo estaba ya en Roma y era recibido por el Papa en varias ocasiones. Urbano le aseguró que le habían leído *Il Saggiatore,* con gran satisfacción por su parte. Galileo insinuó que le gustaría seguir escribiendo, y en particular que tenía la intención de escribir un libro sobre los méritos relativos de los sistemas copernicano y ptolomeico, pero que sus enemigos se lo impedían.

Por lo que sabemos de ambos personajes se podría reconstruir el hilo de la conversación. "Absurdo, —pudo haber respondido el Papa— ya antes impedí que se considerara herético el sistema copernicano, y ahora puedo protegerte. Pero recuerda, tu exposición ha de ser neutral: no tienes ninguna prueba física del sistema copernicano".

"Sí que la tengo —contestó Galileo—. Creo que las mareas son la prueba de que la Tierra se mueve y tengo la intención de titular mi libro *Sobre el flujo y reflujo del mar.*"

"No, —dijo Urbano— no lo titularás así. Ese título atribuiría una importancia excesiva a lo que tú consideras una prueba física, pero Dios podría haber creado un mundo en el que las mareas se debieran a cualquier otra causa y no necesariamente al movimiento de la Tierra." Adviértase que el argumento de Urbano es el mismo que el de Bellarmino: incluso en el caso en que el movimiento de la Tierra produjera mareas, la observación de las mareas no implica necesariamente que la Tierra se mueva. El caso es especialmente irónico, porque el argumento físico de Galileo basado en las mareas era enteramente erróneo. (Las atribuía al cambio diario en la velocidad de la Tierra que resultaba del movimiento compuesto de rotación y revolución.)



FASES DE VENUS, que desempeñaron un papel importante en la conversión de Galileo a la tesis copernicana. Un estudiante, Benedetto Castelli, señaló que en el sistema ptolomeico Venus sólo mostraría fases crecientes, porque estaría siempre entre la Tierra y el Sol; en cambio, en el sistema copernicano Venus mostraría toda la gama de fases. En 1610 Galileo dirigió su telescopio al planeta y pudo observar el paso de una forma convexa a otra creciente. Pensó que era una prueba en favor del sistema planetario heliocéntrico de Copérnico, pero también había otros que sostenían que tales descubrimientos empíricos no podían proporcionar una demostración rigurosa, ya que se podían pensar otras ordenaciones del sistema planetario que explicaran esas mismas observaciones. El gráfico, que muestra las fases de Mercurio, la Luna y las de Venus, está tomado del tratado del matemático suizo Matthias Hirzgarter, de 1643.

Galileo se alborozó al ver que la suprema autoridad derogaba la amordazante orden, y se volvió a Florencia para seguir trabajando en su libro. Adoptó la fórmula popular de un diálogo, como había hecho su padre, un músico notable, que escribió un *Diálogo sobre la música antigua y moderna.* Los tres interlocutores de Galileo son: Simplicio, un tradicionalista que tiene el mismo nombre que un comentarista de Aristóteles del siglo VI; Salviati, que casi siempre expone las opiniones del propio Galileo; y Sagredo, un hombre de mundo, despierto, que hace preguntas inteligentes y a quien la mayoría de las veces le convence el razonamiento de Salviati.

En la argumentación dispuesta en favor del sistema copernicano se incluyen las fases de Venus, la armonía de la ordenación de los planetas y la existencia de las mareas. Difícilmente se puede considerar neutral a la obra, pero concluye con el argumento del Papa puesto en boca de Simplicio:

"Confieso que su argumento del flujo y reflujo del mar es, con mucho, el más ingenioso de los que he oído hasta la fecha; pero no lo considero verdadero ni concluyente; así, teniendo siempre presente una doctrina muy sólida que recibí de una persona muy docta y eminente... sé que si a vosotros dos os preguntaran si Dios en su infinito poder y sabiduría podría otorgar al elemento del agua el movimiento recíproco de cualquier otra forma... ambos responderíais que sí habría podido y sabido hacerlo de muchos modos, algunos de ellos por encima de las posibilidades de nuestro entendimiento."

El fragmento parece inofensivo del todo, y, sin embargo, es sorprendentemente inapropiado como argumento final de las cuatro jornadas precedentes de diálogo. A lo largo de toda la obra Galileo ha intentado mostrar que el razonamiento a partir del Libro de la Naturaleza puede, al menos, establecer que una visión del mundo es mucho más plausible que la otra. No cabe duda de que éste ha sido el método de la ciencia desde entonces. Se podría argüir (como hizo Alfred North Whitehead) que, puesto que un creador omnipotente podía haber hecho el mundo como hubiera querido, lo que sobre todo incumbe a los científicos es descubrir cómo eligió hacerlo.

Al publicarse el *Diálogo* los enemigos de Galileo se sintieron afrentados y se apresuraron a persuadir al Papa de que el libro era descaradamente favorable al sistema copernicano. Convencieron, además, al Papa de que le había presentado como un insensato al poner Galileo su argumento en boca de Simplicio, cuyo nombre evocaba el de "simplón". El Papa, de acuerdo en que Galileo había ido demasiado lejos, dio vía libre a la Inquisición.

Para proceder contra Galileo se presentaban dos tipos de obstáculos: la doctrina de Copérnico nunca había sido declarada oficialmente herética y el *Diálogo* había obtenido el imprimatur de los censores. No obstante, los inquisidores sacaron de los archivos vaticanos un documento fascinante: un informe de la entrevista de 1616 entre Galileo y Bellarmino. En el informe se decía que se le había hecho un requerimiento oficial, y que el astrónomo había prometido no enseñar ni defender de ninguna forma la doctrina copernicana. El Papa estaba furioso; Galileo no sólo le había hecho aparecer como un insensato, sino también le había engañado en lo tocante al resultado del trámite de 1616.

16 de junio de 1633
El mencionado Galileo Galilei por los motivos antes mencionados etc. el Sto. Padre ha decretado que ha de ser interrogado sobre la acusación, amenazándole incluso con la tortura; y, si la mantiene, previa una abjuración de la vehemente [sospecha de herejía] ante toda la Congregación del Santo Oficio, ha de ser condenado a prisión según el arbitrio de la Sgda. Congregación, mandándosele, además, que en adelante no se ocupe en modo alguno, ni de palabra ni por escrito, de la movilidad de la Tierra ni de la estabilidad del Sol; o de lo contrario reincidiría en la pena. Y se prohibirá el libro escrito por él, que lleva por título *Diálogo de Galileo Galilei Linceo.* Además, a fin de que todas estas cosas lleguen a conocimiento de todos, mandó que se envíen copias de la sentencia, que se dará más adelante, a todos los Nuncios Apostólicos y a todos los Inquisidores de la depravación herética, y sobre todo al Inquisidor de Florencia, quien leerá en público dicha sentencia a toda su Congregación, habiendo convocado también al máximo número posible de aquellos que enseñan matemáticas.

LIBRO DE DECRETOS de la Sagrada Congregación de la Inquisición que recoge la condena de Galileo en 1633. La causa contra Galileo se vio interrumpida al presentar éste la carta que en 1616 le dirigió el cardenal Bellarmino. Se llegó después a un acuerdo: Galileo se arrepentiría y prometería no volver a escribir de cosmología. Sin embargo, no se respetó el acuerdo, y se vio forzado a sufrir el humillante ritual de la abjuración, seguida de un arresto domiciliario, la proscripción del *Diálogo* y una prohibición expresa de volver a escribir en adelante sobre el sistema copernicano. (Archivos Secretos del Vaticano.)

En febrero de 1633 se llamó a Roma a Galileo y se le indicó que se pusiera inmediatamente en camino a pesar de los rigores de un viaje en invierno para un anciano de casi setenta años. Se le acusó de desobediendia ante un tribunal de diez cardenales. Con todo, la prueba documental era muy irregular: el documento no estaba firmado ni certificado por un notario, tal como lo exigía un requerimiento de esta clase. Bellarmino había muerto y era por tanto difícil poner en claro la naturaleza del documento. De ahí que los inquisidores, sin revelar la fuente de sus acusaciones, trataron de conseguir que Galileo admitiera que se le había hecho un requerimiento, con lo que habría quedado establecida y legalmente probada la legitimidad del documento presentado. Pero Galileo jugó al final su triunfo. Avisado por sus amigos y los espías de éstos, supo que la Inquisición estaba investigando su visita a Roma de 1616 y se trajo consigo una copia de la carta de Bellarmino. Esta jugada insospechada de Galileo desmanteló a la Inquisición, y los cardenales decidieron levantar la sesión y aplazarla.

Fue un duelo de agudeza e ingenio, y Galileo había superado al Papa. El poder secular, sin embargo, seguía estando en manos de la Iglesia, y el Papa no podía tolerar el bochorno de haberle llamado a Roma para nada. El propio Galileo podía entenderlo así, y por ello estaba dispuesto a un cierto compromiso. Se podía arreglar todo el asunto fuera del tribunal: Galileo confesaría que había ido demasiado lejos, se arrepentiría, se le enviaría después a su tierra y se le mandaría evitar en sus escritos los temas cosmológicos.

Se puede imaginar el sobresalto de Galileo el 16 de junio de 1633 al descubrir que no se había respetado el acuerdo y que en el libro de decretos se había insertado esta frase: "se ha de interro-

gar a Galileo Galilei... respecto a la acusación, si es necesario aplicándole tortura; y si se confirma, tras abjurar de la vehemente [sospecha de herejía] ante toda la Congregación del Santo Oficio, hay que condenarlo a prisión...". Se le conminaba, además, a no seguir tratando, ni de palabra ni por escrito, sobre la movilidad de la Tierra, y se prohibía el *Diálogo*.

En la página siguiente se recogen los resultados del interrogatorio. Galileo dijo (en italiano): "No sostengo ni he sostenido esta opinión de Copérnico después de que se me indicara que debía abandonarla". Se le vuelve a pedir a continuación que diga la verdad bajo amenaza de tortura. Galileo respondió: "Estoy aquí para someterme, y yo no he mantenido este parecer después que se pronunció la decisión, como ya he manifestado". Por último, hay una anotación que dice que no se puede hacer nada más; y esta vez el documento está firmado de puño y letra de Galileo, como es de rigor.

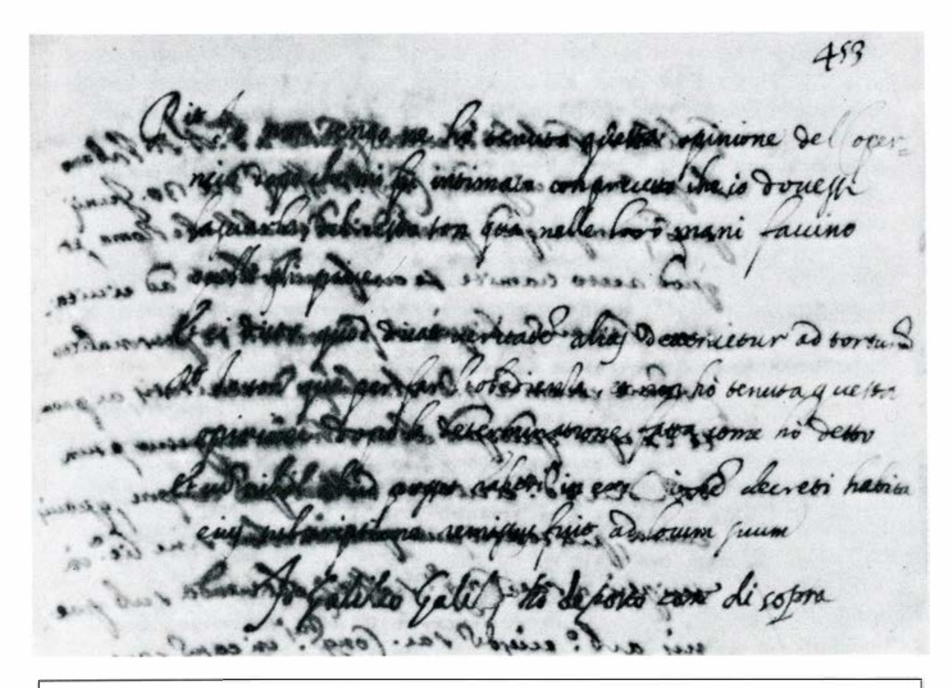
Galileo fue devuelto a su casa de Arcetri, en las afueras de Florencia, en donde permaneció bajo arresto domiciliario hasta su muerte en 1642. Debido en parte al proceso contra Galileo, el centro de la ciencia creativa se desplazó hacia el norte a los países protestantes, y en concreto a Holanda e Inglaterra.

Estoy un tanto perplejo e intrigado ante las alternativas con que se enfrenta hoy el Vaticano al volver a abrir el caso Galileo. En primer lugar, no sé qué bien podría reportar el anunciar que no se debería haber declarado herética la teoría de Copérnico, ya que, hablando con precisión, nunca fue declarada herética. En segundo lugar, Galileo fue procesado no tanto por herejía cuanto por desobedecer órdenes, y parece incuestionablemente claro que ignoró el primer decreto del Indice cuando publicó su *Diálogo*.

En mi opinión, hay espacio abierto a la maniobra si se aceptan los argumentos de Galileo en torno a la relación entre ciencia y Escritura. La verdad de la Biblia, para aquellos que desean afirmarla sin rechazar los descubrimientos de la ciencia, no se debe buscar en una interpretación literal de los seis días de la creación, del Sol parado en la batalla de Gabaón o de la realidad física de la estrella de Belén. Tomo la frase de Galileo como él la tomó del cardenal Baronio: "La Biblia enseña cómo ir al cielo, no cómo van los cielos". Este juicio, me parece a mí, confirmaría lo que desde entonces han aceptado los teólogos tanto católicos como protestantes. Tendría también algo que decir en la controversia que actualmente se desarrolla en Norteamérica a propósito de cómo deben enseñarse en las escuelas las doctrinas de la evolución darwiniana y la así llamada ciencia de la creación.

Cuando los creacionistas de California intentaban que en los libros de texto de biología se presentara la evolución como una mera hipótesis, tenía la sensación de algo que me era familiar. Esa fue la táctica que la Inquisición siguió con el libro de Copérnico: era admisible si se lo presentaba como hipotético. Creo que los creacionistas van a tener tanto éxito como en su día tuvo la Sagrada Congregación del Indice. Galileo creía, por supuesto, que se podía defender el sistema copernicano como una realidad física y no simplemente como una ordenación geométrica hipotética. Es una ironía de la historia que los propios métodos galileanos de argumentación científica sirvieran como instrumentos para hacer ver que lo que en ciencia se tiene por verdadero es tan sólo lo razonable o lo probable; la verdad no puede ser nunca definitiva ni absoluta. Lo que hace a la ciencia tan fascinante es el esfuerzo por irse acercando cada vez más al objetivo inalcanzable del conocimiento perfecto.

El poeta Robinson Jeffers pensaba en esto cuando escribía: "Los matemáticos y físicos tienen su mitología: trabajan al lado de la verdad, sin llegar a alcanzarla nunca; sus ecuaciones son falsas, pero las cosas *funcionan*". Los matemáticos y físicos no pueden pretender que sus enunciados son verdaderos, pero han desechado toda una serie de cosas que no dan el resultado apetecido, y están elaborando una imagen del universo maravillosamente coherente. El sistema copernicano es, sin duda, parte de esta coherencia. Un universo que lleva miles de millones de años evolucionando forma parte también de esta coherencia. Galileo hizo un notable esfuerzo por comunicar a su público esta imagen de belleza y coherencia racional. En nuestros días, los científicos le honrarían si ayudaran a sus respectivos públicos a entender mejor no sólo la majestad y belleza de la moderna imagen científica del universo, sino también el proceso de formar hipótesis y contrastarlas por el que se la alcanza.



"No sostengo ni he sostenido esta opinión de Copérnico después que se me indicara que debía abandonarla; por lo demás, estoy aquí en vuestras manos, haced conmigo lo que os plazca."

Requerido una vez más a decir la verdad, pues de lo contrario se recurriría a la tortura:

"Estoy aquí para someterme, y no he sostenido esta opinión después que se pronunció la decisión, como he dicho antes."

Y puesto que no se podía hacer nada más en ejecución del decreto, obtenida su firma, se le envió a su lugar.

"Yo, Galileo Galilei, he testificado como consta más arriba".

ABJURACIÓN DE GALILEO tal como aparece en el libro de decretos a continuación de la condena. Luego se retiro a su casa de Arcetri, en las afueras de Florencia, donde encontró la muerte en 1642.

Temas metamágicos

Zancadillas, señuelos, evolución conductual y otras competiciones de astucia y estrategia

Douglas R. Hofstadter

En el verano de 1962, Robert Boeninger y yo –a la sazón jóvenes estudiantes de matemáticas en Stanford– retornábamos de un viaje a Praga. Para no aburrirnos en el autobús, ideamos un curioso juego de números. Aunque sus reglas eran sencillas, el juego requería cierta astucia, siendo preciso "dominar psicológicamente" al contrario por procedimientos más o menos perversos. Las reglas que inicialmente establecimos eran como sigue: Cada partida constaba de diez turnos; en cada turno, cada uno de nosotros pensaba y anotaba secretamente un número, que después habría de comparar con el del otro. Uno debía elegir su número (forzosamente entero) en la gama de 1 a 5; el otro, de 2 a 6. Cada uno conservaría su propio número –es decir, lo sumaría a su puntuación– siempre que los pensados por ambos no difirieran exactamente en una unidad. De ser éste el caso, sería el jugador con *menor* número quien recogiese ambos para sí. Por ejemplo, si yo decía 2 y Robert decía 3, yo me anotaba cinco puntos, y el pobre Robert, ninguno. ¡Muy entretenido! Al menos, hasta que yo dije 5 y Robert me saltó con un 4.

Nos parecía que la cosa podría ser interesante si los campos de elección de uno y otro no fueran exactamente iguales, porque sería entonces difícil aclarar quién llevaba realmente la ventaja. A primera vista da la impresión de que sería el jugador "alto" –que elige de 2 a 6– el más favorecido; pero su aparente ventaja queda delicadamente compensada por el hecho de que al cantar 6 corre el riesgo de dar un traspiés si el contrario le sale con un 5, mientras que su 6 nunca puede dejar en falso al otro jugador. Por otra parte, el jugador "bajo" puede siempre pedir 1 sin temor a verse "socavado". Pero aunque esta asimetría nos parecía preciosa, pronto convinimos en que seguramente era preferible que ambos campos –de 1 a 5– fuesen iguales, y de esta forma jugamos. Aquí he llamado a este juego "Zancadillas".

La lucha fue feroz. Lo más apasionante era ver como en nuestras mentes iban apilándose y replegándose los niveles de anticipación a la táctica del otro. Por ejemplo, yo podía tentar a Robert cantando 4 varios turnos seguidos, buscando atraerle a pedir 3, para justamente en ese momento cambiar yo de plan, pedir 2, y zancadillearle.

Cuando en otoño regresé a Stanford de mi viaje a Europa estaba yo ansiando tener acceso a un ordenador para jugar con él. Mi amigo Charles Brenner había preparado hacía poco un programa que compilaba frecuencias de letras y de grupos literales (trigramas, más concretamente) de un fragmento de texto inglés (o de otro idioma cualquiera), y después, gracias a un generador de números aleatorios, engendraba un texto pseudo-inglés, cuyos trigramas aparecían con frecuencia igual a la de la muestra del texto "origen". Mucha impresión me había causado la eficacia con que tal algoritmo conseguía captar pautas en apariencia muy profundas del idioma inglés, y me di cuenta de que la misma idea podría aplicarse para redactar un programa de juego. En particular, la idea de lograr que el programa detectase los sesgos sistemáticos del juego del adversario y se aprovechase de ellos para aventajarle –en breve, para lograr que el ordenador se anticipase al contrario– era una idea obsesiva y fascinante. Y mejor todavía si el contrario fuese otro programa, que intentase otro tanto con el mío.

Me veo todavía allí, de pie, inclinado sobre la impresora a través de la cual el ordenador habría de ir vertiendo su salida, pendiente del desarrollo de los juegos, que iban emergiendo línea tras línea. Haríamos que nuestros programas jugaran partidas de varios centenares de turnos, sometiéndolos así a una prueba concienzuda. Mi programa solía arrancar flojamente, por no haber "olido" todavía ninguna pauta o sesgo en la conducta del contrario. Empero, antes o después llegaba un momento en que el programa "cogía el viento" y conseguía unas cuantas zancadillas decisivas, casi seguidas. Lo veía yo lanzarse al ataque, con frecuencia tomando la delantera y barriendo al contrario. Sentía entonces una sensación de aplastante poderío, de contemplar la fuerza de la inteligencia dominando a la fuerza bruta. Hoy me trae a la memoria uno de mis títulos favoritos: *Chess for Fun and Chess for Blood*, de Edward Lasker. El título logra apresar la sutil combinación de buena voluntad y de tensa rivalidad que se experimenta al jugar con ahínco contra los amigos.

Desde entonces he podido darme cuenta de cuán universal y primitivo este sentimiento es. Seguramente, la emoción de ver enfrentarse, en la cancha o sobre el tablero, dos estrategias y verlas competir sea el aspecto más fascinante que envuelve a todos los deportes y juegos. Esta clase de competición gratuita y deportiva parece agradarles incluso a los perros. Cuando juego a perseguir y dejarme perseguir por mi amigo Shandy –un fox-terrier– he observado que tiene un sentido muy preciso de la medida en que yo logro anticipar sus movimientos, y en el regateo él consigue siempre estar un "pliegue" –en nivel de astucia– por encima de mí. Siempre que yo creo haber detectado su patrón, se esquiva, no sé cómo parece darse cuenta y cambia su estrategia, acabando yo por arremeter contra un perro que ya no se encuentra allí.

Ah, claro, de cuando en cuando me deja ganar; lo justo para mantenerme interesado. Posee incluso el sentido de la provocación. Deja caer la varita o la pelota delante de mí, fingiendo desinterés, incitándome fríamente a que yo amague por él. Pero Shandy lo tiene todo previsto. Conoce cuál es mi rapidez de movimiento, conoce la suya propia y sabe cuáles son las fintas con que puedo pretender engañarlo.

Más aún, a Shandy parecen ocurrírsele con frecuencia nuevas maneras de ir modificando su estrategia, con lo que yo me encuentro sencillamente incapaz de hacerme con la metapauta de tales variaciones, e imposibilitado de antici-

parme a sus regates. No; hay algo de extraordinaria astucia en su mente canina, y está claro que el gozoso ejercicio de esa inteligencia innata refleja una cualidad más profunda y general, común a personas y perros, a saber, esa enorme ventaja evolutiva que, en este mundo, donde el hombre devora al hombre y el perro se come al perro, supone la inteligencia para aquellos seres que la poseen.

Volvamos con las "zancadillas". Un buèn día, Jon Peterson, un estudiante de matemáticas de segundo ciclo que solía rondar por el "centro de cómputo", retó a mi programa con uno suyo propio. Para prepararlo, explicó Peterson, se había servido de la teoría de juegos. Aunque ello no me preocupó al pronto, cuando enfrentamos nuestros programas no tardé en darme cuenta de que sí había razón suficiente para ello. No fue que mi programa sufriera una zurra ignominiosa; fue que jamás pudo olisquear el menor sesgo, y, partida más o menos, acababa siempre empatando con el de Jon. Esto era desconcertante. Jon me explicó que había calculado unos coeficientes de ponderación para cada una de las elecciones, de 1 a 5, coeficientes que nada tenían que ver con la estrategia del contrario, sino solamente con los "pagos" o ganancias de cada par de posibilidades. He aquí la "matriz de pagos" de que me hablaba Jon:

		JON				
		1	2	3	4	5
YO	1	0	−3	2	3	4
	2	3	0	−5	2	3
	3	−2	5	0	−7	2
	4	−3	−2	7	0	−9
	5	−4	−3	−2	9	0

Los números de esta tabla expresan cuánto espera Jon ganar con respecto a mí para cada combinación de números que podamos elegir. Notemos la "antisimetría" de esta matriz, que es la propiedad de que al reflejarse cada número con respecto a la diagonal de ceros cambia de signo, mostrando así que lo bueno para mí es lo malo para Jon. Y evidentemente, los ceros de la diagonal significan que nadie se beneficia al cantar números iguales, salvo, tal vez, en que nos aproximamos así un turno más al final de la partida.

Por ser el juego totalmente simétrico con respecto a los dos jugadores, no podrá existir ninguna estrategia que le dé siempre la victoria a uno de ellos. De haberla, ambos podrían servirse de ella y tener la certeza de vencer al otro. Lo que sí hay, no obstante, es una estrategia *optimal*, como afirma la teoría de juegos, estrategia que en un sentido estadístico sí garantiza a largo plazo el empate con el adversario. Tal estrategia se funda en asignar coeficientes de ponderación, o "pesos", para las frecuencias con que deben elegirse cada uno de los cinco números. Para determinar los pesos se requiere resolver un sistema homogéneo de cinco ecuaciones lineales con cinco incógnitas. Cada ecuación expresa que la esperanza matemática del adversario ha de ser igual a cero. Si los pesos relativos que Jon asigna a 1, 2, 3, 4 y 5 son respectivamente a, b, c, d y e, entonces *mi* esperanza matemática al elegir yo, pongamos por caso, el 3, será de $-2a + 5b - 7d + 2e$ (como resulta directamente de la tercera fila de la matriz de pagos). Imponiendo que esta ganancia esperada sea igual a cero tendremos una de las cinco ecuaciones. Las otras cuatro se plantean análogamente. El sistema a resolver es, por consiguiente,

1. $-3b + 2c + 3d + 4e = 0$
2. $3a - 5c + 2d + 3e = 0$
3. $-2a + 5b - 7d + 2e = 0$
4. $-3a - 2b + 7c - 9e = 0$
5. $-4a - 3b - 2c + 9d = 0$

Resolver el sistema equivale a calcular la inversa de una matriz de 4 × 4. Así lo hizo Jon, determinando que las ponderaciones de 1, 2, 3, 4 y 5 debían corresponderse con 10, 26, 13, 16 y 1. Así pues, según la teoría de juegos, el jugador "optimal" no debería cantar 5, sino muy raramente: una vez de cada 66, por término medio. La elección más común debiera ser 2. Poco bièn le haría, sin embargo, apostar 10 veces seguidas por el 1, a continuación, 26 veces seguidas por el 2, 13 veces por el 3, etcétera. No; es preciso ir eligiéndolos al azar, pero de manera que sus probabilidades de ser elegidos se correspondan con sus pesos relativos.

Imaginemos un dado de 66 caras, de las cuales 10 llevan grabado el número 1; una, el número 5; y correspondientemente las demás. En cada jugada deberíamos lanzar este dado (o una simulación computarizada suya). Dicho con otras palabras, al jugar según esta estrategia es imperativo evitar que nuestra conducta pueda ajustarse, siquiera involuntariamente, a ninguna pauta. No importa cuán tentador ello pueda ser: hay que resistir. Incluso si el contrario jugase el 5 una docena de veces seguidas, es forzoso hacer caso omiso y seguir lanzando nuestro dado imaginario de 66 caras. Así es como actuaba el programa de Jon, y por eso el mío no pudo encontrar ningún sesgo del que beneficiarse. Si el programa de Jon hubiese caído en la tentación de intentar anticiparse al mío, tal vez éste hubiera podido detectar alguna regularidad y utilizarla en perjuicio del otro. Pero su programa nada entendía de tentación o provocaciones. Se limitaba a proseguir ciegamente con su táctica, y cuanto más durase la partida, tanto más seguramente conseguiría empatar. Si ganaba, tanto mejor; pero su probabilidad de conseguirlo no era mejor del 50 por ciento. ¡Y a eso llamaban estrategia óptima!

Fue para mí una experiencia frustrante y vergonzosa ver que mi programa, con toda su "inteligencia", luchando por superar la ciega aleatoriedad del programa de Jon, no conseguía salir adelante. Me sentí decepcionado al saber que la estrategia en cierto sentido más inteligente, sobre ser estúpida, no prestaba atención alguna a las acciones de su enemigo. Esta situación parecía chocar frontalmente contra el objetivo inicial de "Zancadillas", que era intentar que los jugadores buscasen anticiparse a las jugadas del otro a niveles cada vez más profundos.

Cuando ví la completa demolición que la teoría había efectuado sobre nuestro juego, perdí interés por él. Más recientemente he vuelto a reflexionar sobre estos juegos donde las pautas del juego propio pueden ponernos en desventaja, hasta en el mismo caso en que la teoría de juegos pueda determinar una estrategia óptima desde el punto de vista teórico. Sigue habiendo algo curiosamente fascinante en la provocación, el coqueteo y demás maniobras utilizadas en aquéllos; maniobras que vívidamente nos recuerdan estrategias de probada eficacia en el curso de la evolución de los seres, y que parecen incluso tener importancia en muchas situaciones políticas actuales.

Por otra parte, al jugar contra adversarios humanos, resulta terriblemente pedante y libresco valerse de una estrategia de pura teoría de juegos, y más aún si nos encontramos ante "tácticas de provocación". Como es obvio, las metas de los humanos son mucho más complejas que la mera victoria en un juego, y este hecho determina en gran medida cómo se juega. Así, por ejemplo, en el juego entre humanos la audacia y la impaciencia son ambas factores psicológicos de peso, que la estrategia óptima en el sentido habitual de la teo-

ría para nada considera. Por consiguiente, tengo la impresión de que esta clase de juegos son todavía modelos importantes de como las personas y las organizaciones afrontan retos y amenazas complejas.

Describiré, por tanto, algunas recientes variantes de "Zancadillas" con las que he estado experimentando. En todas ellas se trata de ver hasta dónde pueden forzarse las cosas engatusando al adversario. Mi objetivo era fomentar y estimular la provocación, lo que significa que uno de los jugadores haga alarde de una pauta durante un tiempo, como diciendo al adversario, "¡Anda, atrévete! ¡Vamos, échame una zancadilla!" Para incentivar este tipo de alardeos parecía razonable premiar con puntos extra las pautas no detectadas por el oponente. Llamaré "Señuelos" a esta versión del juego.

Imaginemos que usted y yo jugamos a "Señuelos". Yo canto un 4, usted pide un 1. Lo mismo que en "Zancadillas", yo me quedo los cuatro puntos, y usted, uno. Supongamos ahora que en el siguiente turno yo vuelvo a cantar 4, y que usted dice 2. Si estuviéramos jugando a "Zancadillas", volvería a apuntarme cuatro tantos; en "Señuelos", sin embargo, las repeticiones son fuertemente recompensadas. Por ello recibo el producto de mis dos primeros números: 4×4, es decir, 16. Ahora supongamos que en mi siguiente turno yo volviera a pedir 4, y usted, nuevamente un 2. Mi osadía me hace ganar $4 \times 4 \times 4$, es decir, 64 puntos, mientras que usted consigue tan sólo 2×2, esto es, cuatro. Por tanto, en estos tres turnos yo habré ganado $4 + 16 + 64$, en total 84 puntos, frente a sus $1 + 2 + 4$, que sólo suman siete. Claro que usted no ha estado haciendo oídos de mercader a mis gambeteos; sencillamente, ha estado al acecho de su oportunidad. Ahora entra usted con un 3, confiando en zancadillearme. ¡Lástima, porque ahora yo voy y eligo 2! Así gano cinco puntos, y usted ninguno. Lo siento, pardillo.

Pero supongamos que yo hubiese sido tan inconsciente como para dejarme pillar. Si hubiese pedido 4 también esta vez, lo haría esperando alcanzar los 256 tantos. Pero al haber logrado usted segar pauta con su 3, es usted quien logra una gran recompensa, a saber, 259 puntos (los tres puntos suyos más los 256 con que yo soñaba).

"Señuelos" es un juego que admite muchas variantes. La que acabo de presentar es quizá la más sencilla. Si se desea pueden recompensarse conductas de pauta más compleja. No estoy completamente seguro de cuál sea para ello el procedimiento óptimo, y así, cuanto sigue –el juego que yo llamo "Superseñuelos"– es tan sólo una muestra de cómo se podrían incentivar otras pautas-señuelo más variadas. En efecto, supongamos que en lugar de responder con 1-2-2 a mis jugadas 4-4-4 hubiera usted pedido 2; después, 1; y después, 2. Podría usted tener buenos motivos para hacerlo así. Quizá fuera ésta la continuación de una pauta *suya* propia, y por ello le conviniera mantenerla todavía. Si sus cuatro jugadas anteriores hubieran sido 2-1-2-1, las tres explicadas habrían proseguido la misma pauta. Según cómo se efectúe la puntuación pudiera merecer la pena prolongar más la pauta propia que zanjar la mía, comparativamente nueva. Si la serie 2-1-2-1-2-1-2 valiera el producto de sus elementos, su puntuación sería 16. (En realidad sólo valdría 16 si viniera precedida de otro grupo 2-1, pero eso es ahora irrelevante.) Al detectar usted mi pauta 4-4 puede parecerle preferible dejarme sacar mi tercer 4 y pedir usted otro 2, pensando así confiarme algo más, para en ese momento atacar súbitamente y zancadillearme.

¿Cómo habrán de ser las pautas admisibles en "Superseñuelos"? En este instante me siento inclinado a limitarlas a una definición bastante sencilla, si bien son posibles otras más complejas. La idea fundamental es que existe pauta cuando en una situación dada se repite lo que se hizo la última vez que se estuvo "en esa situación". Por consiguiente, todo dependerá de lo que entendamos por "la misma situación". Pongamos que acaba usted de jugar x y se dispone a jugar y. Diremos que se está creando una pauta si en la última ocasión que usted jugó x también jugó y a continuación. Por ejemplo, si sus siete últimas jugadas hubiesen sido 3-4-1-5-3-4-1, para proseguir con la pauta es forzoso que ahora pida 5, y después, sucesivamente, 3-4-1-5-3-4-1, etcétera. Al establecerse por primera vez la serie 3-4-1-5, es evidente que no se obtendrán puntos extra, porque no hay pauta mientras no comienzan las repeticiones. Por tanto, la pauta sólo empieza a asomar al pedir el segundo 4, con lo que se recaudan ya 12 ($= 3 \times 4$) puntos. La siguiente jugada acorde a pauta, el 1, le hace embolsarse otros 12 puntos, y seguidamente, al cantar 5, ganará usted 60 tantos más (siempre que no le atajen antes). Empero, tan pronto tenga usted que romper la secuencia, el producto acumulativo partirá de cero.

Si al haber usted jugado 3-4-1-5-3-4 le preocupase lo evidente del 1 que vendría a continuación, podría usted pedir 4 en su lugar, con lo que si bien rompe su pauta abre otra nueva (a saber, 4-4). Ahora, mientras en la versión ordinaria de "Señuelos" ello le reportaría 16 puntos, en la versión "Súper" solamente se comenzarían a recoger los beneficios de la pauta a partir del *siguiente* 4, que sólo entonces habría usted efectuado "la misma elección" en "la misma situación" dos veces seguidas.

Una de las limitaciones de "Zancadillas" y "Señuelos" es que en ambos la gama de valores a elegir es muy restringida. Buscaba yo un juego donde fuera lícito tomar valores arbitrariamente grandes. No costó demasiado dar con el siguiente, al que llamaré "Infrapujar". Usted y yo pensamos sendos números enteros positivos. Si son distintos y no se diferencian en una unidad, aquel de nosotros que haya mencionado el más *pequeño* gana ese número. (Como es obvio, el otro jugador no recibe nada.) Si los números difieren en una unidad, quien haya cantado el número *mayor* ingresa para sí *ambos*. En este aspecto, este juego de Infrapujar viene a ser como el reverso de "Zancadillas". Y si nuestros dos números son iguales, ninguno de nosotros consigue ningún beneficio.

El objetivo puede consistir en alcanzar un número prefijado de puntos –no importa mucho cuántos. Una elección atinada pueden ser 1000, si bien 100, o incluso un millón, servirían perfectamente. Pensemos en las consecuencias sobre el juego. Como es obvio, a usted no le convendrá pedir números muy grandes, por ser entonces verosímil que yo cante un número menor, con lo que yo ganaré algo, y usted, nada. Al parecer, estamos ambos presionados para pedir números más bien pequeños. Empero, si nos ceñimos siempre a números bajos, las probabilidades de ser atajado por arriba, o "repelado", son grandes. La puntuación, por otra parte, irá avanzando muy lentamente. Si la meta son 1000 puntos y avanzamos hacia ella a paso de tortuga, tal vez alguno de nosotros, aburrido, quiera acelerar la marcha. Para ello tendrá que aventurarse a cantar números grandes, 81 por ejemplo. Evidentemente, de poco vale hacer esto una sola vez, porque el otro jugador no puede saber por adelantado que va a salir un número alto.

Supongamos, no obstante, que yo pida 81 varias veces seguidas. (Al "Infra-

pujar" la insistencia en pautas no tiene recompensa, al menos en esta versión.) Pronto observará usted tal regularidad, sintiéndose tentado a cantar 82 para repelarme. O tal vez, si es usted más conservador, prefiera ir acumulando puntos más prudentemente a costa de mi estupidez, eligiendo números cercanos a 81, pero suficientemente por debajo, como 70. ¡Ajá! Una vez que yo haya conseguido atraerle a valores próximos al mío podré empezar a intentar saltos a valores *inferiores al suyo*. Tal vez pueda incluso adivinar en qué momento va a picar usted. Si lo consigo, ¡voy a dejarlo listo para una buena limpieza en seco!

Al "Infrapujar", tal vez lo más interesante sea que cada jugador puede, valiéndose como carnada de pautas evidentes, plantear varios juegos esencialmente idénticos a "Zancadillas" en diversos puntos de la escala numérica. Yo puedo plantear un tal juego en torno a 81, induciéndole a cantar 82 justamente cuando yo espero. Entretanto usted puede estar echándome un contracebo en torno a 30, apuntándose 30 tantos cada vez que yo cometo la extravagancia de provocar con mi 81, sabiendo que antes o después yo habré de intentar cazarle en valores más bajos, bien cantando por debajo de usted, o bien buscando repelarle.

A mi me fascina ver cuántas subpartidas paralelas pueden darse simultáneamente de forma espontánea. Particular interés tiene la fase final, cuando alguno de los jugadores ha conseguido ventaja substancial. En esos momentos, el jugador rezagado propende a jugar muy conservadoramente, pidiendo números muy pequeños. Así incrementa mucho las posibilidades de repelar al contrario. Interviene también en el juego un elemento de naturaleza estrictamente psicológica: la impaciencia humana. Nadie desea envejecer en el sendero hacia la victoria, como sucedería eligiendo números pequeños varios centenares de veces. La simple ansia de variedad inducirá inevitablemente a emprender una arrancada imprudente, y ello, sin duda, puede explotarse en beneficio propio.

Buena parte de las conductas incitantes y provocativas que espontáneamente tienden a presentarse en estos juegos tienen algún paralelismo en la evolución biológica. El retrato más vívido y pintoresco que conozco de las misteriosas fintas y contrafintas que los seres vivos van creando al competir unos con otros es el pintado por Richard Dawkins en su libro *El Gen Egoísta* (Editorial Labor, Barcelona). En él, la discusión se centra en la noción de "estrategia evolutivamente estable" (EEE), nomenclatura debida a John Maynard Smith. Por definición, una EEE es "una estrategia que, de ser adoptada por la mayoría de individuos de una población, no podrán superar otras estrategias alternativas". En este caso, empero, "adopción de una estrategia por un individuo" debe traducirse porque tal individuo está en realidad provisto de genes responsables de su política conductual.

El primer ejemplo que Dawkins ofrece de ese concepto se refiere a genes rivales correspondientes a dos tipos de conducta agresiva en una especie dada. Las dos estrategias son llamadas de "halcón" y de "paloma", y comparten las recientes connotaciones políticas de estos términos. Si asignamos x puntos positivos a la victoria en una pelea, y puntos negativos a la pérdida de tiempo y z puntos negativos a salir herido de ella, podemos calcular el equilibrio óptimo eventual para esa población, que será función de x, y, z. Tal equilibrio puede lograrse, tal vez sólo como promedio a lo largo del tiempo, mientras la población va oscilando desde la mayoría de halcones a la de palomas, y recíprocamente, o puede ser también un equilibrio estático, donde las proporciones de uno y otro tipo permanecen constantes.

Dawkins examina una amplia variedad de ejemplos de la vida humana, comparándolos con estrategias del mundo de la evolución no-humana. Casos como el de la "guerra de la gasolina", donde se confunden un sistema de teóricos precios fijos y de traidores descuentos, quedan perfectamente encuadrados en el análisis de teoría de juegos que Dawkins plantea. Otras de las estrategias que también examina son las de "vengador justiciero" (individuo que al ser atacado por halcones se comporta después como un halcón, mientras que atacado por palomas se conduce como paloma), la del "bravucón" (individuo que va por ahí con aires de halcón, hasta que otro individuo le devuelve el golpe; entonces huye apresuradamente) y la del "vengador por tanteo" (individuo análogo al vengador justiciero, que de cuando en cuando ensaya con fines experimentales una "escalada" temporal de la contienda). Estas cinco estrategias pueden ser todas ellas activadas simultáneamente por simulación, mediante ordenador, de una población grande, lo mismo que se hizo para las estrategias de "Zancadillas". Gracias a estas simulaciones podemos conocer cosas acerca de las estrategias optimales sin necesidad de aplicar teoría de juegos. En esencia, sostiene Dawkins, esto es lo que la naturaleza ha venido haciendo durante eones: poner en escena enorme número de estrategias en competencia unas con otras. A largo plazo, este despilfarro de la naturaleza termina por pagar dividendos, al crearse especies provistas de estrategias que, en algún sentido del término, son optimales.

Dawkins se vale de este concepto para mostrar como puede parecer que una población está sometida a un proceso de selección de *grupo*, cuando en realidad basta una mera selección de *genes* para dar cuenta de lo observado. Dawkins escribe: "La noción de EEE formulada por Maynard Smith nos permitirá por vez primera ver claramente como una colección de entidades independientes y egoístas puede llegar a parecer un todo único y organizado... La selección al nivel más bajo –el de gen– puede dar la impresión de selección a niveles superiores".

El libro contiene otros muchos ejemplos, algunos muy llamativos, de curiosas estrategias que muestran alarmantes paralelismos con situaciones del mundo de la política humana, incluidos los peligros de la carrera armamentística de nuestros días. Tanto así, que en más de una ocasión Dawkins hace ver explícitamente la analogía, haciendo referencia a las "carreras de armamentos de carácter evolutivo", y al valor de supervivencia que para una especie representa su capacidad de engañar a otra.

Una de las partes más amenas del libro de Dawkins, pese a su absoluta seriedad, es la dedicada a la evolución de la sexualidad. Para explorar como pudo ésta ir evolucionando, Dawkins inventa gametos (óvulos y espermatozoos) "honestos" y "descuideros", haciendo ver como a lo largo de muchas generaciones los gametos honestos evolucionan hasta convertirse en hembras, mientras los descuideros lo hacen en machos. Por el camino examina las conductas "gazmoña" y "lanzada" (como estrategias de la hembra) y los comportamientos "fieles" y "donjuanescos" (como posibles estrategias masculinas), juntamente con la estrategia de "felicidad doméstica", no sin insistir en que se trata únicamente de imágenes metafóricas, que no deben tomarse literalmente, y mucho menos, antropomórficamente. Pero sazonadas con un grano de sal pueden ayudar mucho a comprender los mecanismos de la evolución. Y muchas de

tales estrategias tienen además correspondencia en la clase de juegos de números que acabo de describir.

Estando yo preparando este artículo sostuve una larga conversación telefónica con Robert Boeninger, durante la cual ensayamos diversas versiones de nuestros nuevos y viejos juegos de números. Una de las ideas que me intrigaban era saber qué ocurriría al "Infrapujar" sin la meta de un número específico de puntos –como por ejemplo, 1000– a conseguir para ganar. Para terminar el juego habría que establecer algún otro tipo de convenio. El mío favorito era: "La partida termina cuando los números de los jugadores difieran en 2 unidades". Por tanto, si yo dijera 10 y usted pidiera 8, la partida habría terminado en ese momento (y ninguno de los dos ganaría ningún punto en ese turno).

Robert y yo sometimos a prueba esta versión, descubriendo enseguida que cuando uno de nosotros empezaba a perder no le cabía otra solución que la búsqueda de un "punto muerto": hacer que el juego no terminase. Una de las formas que el rezagado tiene de conseguirlo es tomar al azar números grandes, que al ser imposibles de prever hacen que jamás pueda alcanzarse la condición de fin de partida. El jugador con ventaja, no teniendo nada que perder, cooperará cantando sistemáticamente números pequeños o medianos, sumando más y más puntos y agrandando su ventaja. Se llega así a una especie de círculo vicioso donde ambos jugadores colaboran hacia el punto muerto.

Robert sugirió, como forma de evitar esta *impasse*, añadir la condición de que si alguno de los jugadores gana en cinco turnos seguidos (es decir, consigue por cinco veces consecutivas un número positivo de puntos), el juego ha de terminar. De esta manera se le prohíbe al jugador rezagado la búsqueda del punto muerto, porque ahora tal conducta le supone la derrota. Como Robert hizo notar, incluso si uno va en desventaja se puede intentar liquidar la partida ganando cinco veces seguidas, porque cuando se hayan agotado los cinco turnos tal vez vayamos por delante. A mí me gusta llamar "Acometida" a este juego, porque me hace sentir como un tigre al acecho de una jirafa por la sabana, que luego abate la presa de un salto veloz y violento.

Años después del episodio de "Zancadillas", estábamos un día mi hermana Laura, nuestro amigo Michael Goldhaber y yo almorzando en la Península Creamery, anotando diversas trivialidades en las servilletas, como solíamos hacer, cuando se nos ocurrió la idea de echar una partida de números, pero con *tres* jugadores. Decidimos que cada uno de nosotros habría de elegir en cada turno un número dentro de un cierto intervalo, y puesto que no parecía muy original dejar sencillamente que fuese el número más alto quien ganase, y escasamente más apasionante que ganase el más pequeño, la idea de dejar ganar al intermedio se impuso por sí misma. Decidimos, pues, admitir que sólo puntuase en cada turno el jugador más mediocre. Evidentemente, su puntuación se incrementaría en el número mediocre; las puntuaciones de los demás no variarían en ese turno. (Se presentó un pequeño problema cuando dos jugadores eligieron iguales números, pero improvisamos una regla para salir del paso.)

Así que al cabo de, pongamos por ejemplo, cada cinco turnos comparábamos nuestras puntuaciones, y la más alta... –¡ojo, espere un momento! ¿Por qué habría de ganar la puntuación total *más alta*? Después de todo, ello sería contrario al espíritu de los turnos. Vimos con toda claridad que si el espíritu del todo había de ser coherente con el de las partes, debería ganar precisamente el jugador de puntuación *intermedia*. Llamamos por ello "Mediocridad" a nuestro juego; pero de entonces acá he decidido rebautizarlo con el nombre de "Hruska".

Este nombre está inspirado en una célebre observación del senador Roman Hruska, de Nebraska. En la época en que inventamos el juego, el presidente Nixon estaba intentando conseguir que el Senado refrendase su propuesta de G. Harrold Carswell para el Tribunal Supremo de los Estados Unidos. En una entrevista radiofónica, donde defendía a Carswell de sus detractores, el senador Hruska salió con la profunda idea siguiente: "Incluso admitiendo que (Carswell) fuese mediocre, debemos tener presente que hay montones de jueces, abogados y personas mediocres. También ellos tienen derecho a estar representados y a tener un poco de suerte, ¿no es verdad? No podemos tener allí sólo figuras como Brandeis, Frankfurter o Cardozo y gente por el estilo". Lo sentimos por la mediocridad, porque Carswell no fue aceptado por el Senado. Su defensa funcionó en cambio admirablemente para Hruska, a quien la posteridad ha reservado un puesto entre los campeones de la mediocridad.

Y hablando de campeones. Tras devorar nuestros bocadillos y trasegar los batidos de crema (servidos a la vieja usanza en recipientes especiales de metal) nosotros tres nos quedamos de sobremesa en nuestro departamento y jugamos unas cuantas rondas de este jueguecito. Enseguida se nos ocurrió la inspirada idea de establecer el campeonato mundial de *mediocridad*. Por consiguiente, sumamos las puntuaciones correspondientes a unas cuantas partidas, para ver quién tenía la máxima. Pero ¿cómo la máxima? De nuevo, algo parecía ir mal. El penetrante espíritu de la mediocridad se había posado sobre nosotros a modo de nube de contaminación, apremiándonos a declarar campeón no al jugador que más partidas hubiera ganado, ni tampoco al que menor número de tantos hubiera conseguido, sino al intermedio. Así se hizo, y yo he olvidado a quién correspondió tal honor. Creo que es lo pertinente.

Y en ese punto parecía emerger un principio general, que establecía en el juego de "Hruska" una jerarquía de niveles. Para ganar en el Nivel Dos (es decir, en el nivel de nuestro "campeonato") lo mejor es ser jugador mediocre en el Nivel Uno (es decir, en el nivel de la partida individual). Significa esto que, mientras para ganar en el primer nivel era deseable ser *extraordinariamente* mediocre en la elección de números mediocres, ahora es preferible ser *mediocremente* mediocre al elegirlos. ¡Qué perversidad! ¡Qué maravilla! ¡Qué maravillosa perversidad! Se corresponde perfectamente con un principio general de perversidad, verdaderamente digno del Zen, aplicable a muchas facetas de la vida: Se acaba por perder si uno se esfuerza demasiado en ganar.

Tras la sesión en que "Hruska" vio la luz, estuve trabajando en otras de sus versiones, buscando pulirlo y hacerlo más elegante. Permítaseme presentar sus reglas en la forma actual.

El problema principal de "Hruska" estriba en evitar los empates, no sólo en el Nivel Cero, sino también a todos los niveles superiores. La mejor solución que hasta ahora he encontrado es ésta: Hagamos que los jugadores dispongan de gamas de valores ligeramente desplazadas con respecto a los demás. Más concretamente, hagamos que el jugador A tenga que elegir un entero; de 1 a 5, pongamos por caso. Los jugadores B y C tendrán entonces gamas de valores fraccionarios: B debe elegir números de la forma $n + 1/3$, y

C, números de la forma $n + 2/3$, siendo n un entero que puede ir de 1 hasta 5. Como es obvio, ahora no podrán darse empates en el Nivel Cero.

¿Y qué sucederá ahora en el Nivel Uno? Recordemos que una partida de Nivel Uno consiste en cinco rondas de Nivel Cero, en cada una de las cuales el jugador que ha elegido el número intermedio es recompensado con él, mientras los otros dos nada deberían recibir. Bien, la primera parte del plan de tanteo es buena, pero la segunda tiene que ser ligeramente modificada para evitar empates en niveles superiores. Supongamos que los números elegidos en una ronda hayan sido: A,3; B,$2\frac{1}{3}$; y C,$4\frac{2}{3}$. Por tener el número intermedio, A recibe 3 puntos. Sin embargo, B y C no reciben ahora cero puntos cada uno, sino el más cercano de los valores de su gama a cero. Así, a B le es asignado 1/3 de punto, mientras que C recibe 2/3 de tanto.

El razonamiento que inspira tal proceder es simple. Tras cinco turnos, cada jugador tiene que sumar cinco números de la misma *forma* general. Los cinco enteros puros del jugador A tendrán por suma un entero puro; los cinco números de la forma $n + 1/3$ del jugador B darán una suma de la forma $n + 2/3$, mientras los cinco $n + 2/3$ del jugador C tendrán suma de la forma $n + 1/3$. Por tanto, en el nivel siguiente, B y C habrán permutado sus papeles en cuanto respecta a la forma de sus números. En consecuencia, las tres puntuaciones totales del nuevo nivel tienen todas expresiones diferentes, y el empate es imposible. Habrá por tanto siempre una puntuación de máxima mediocridad, y sólo una, en el Nivel Uno: la ganadora.

Para estudiar ahora el juego del Nivel Dos deberemos asignar puntuaciones a las partidas de Nivel Uno. El ganador de una partida de Nivel Uno obtiene, evidentemente, su número de puntos intermedio, mientras los otros dos jugadores reciben, como antes, las aproximaciones más cercanas a cero posibles dentro de sus respectivas formas. Para el jugador A ello supone, como antes, cero puntos. Para B, sin embargo, significa 2/3 de tanto, y para C, 1/3. Cinco juegos de Nivel Uno forman una partida de Nivel Dos. El hasta ahora tácito "principio de homogeneidad de niveles" nos obliga a sumar los cinco números de Nivel Uno a fin de calcular los tanteos de Nivel Dos. No es preciso decirlo: las mismas razones que antes impidieron los empates subsisten ahora, y por ello habrá siempre un vencedor de Nivel Dos.

El mismo principio general permite, como es obvio, generalizar a *cualquier* número de niveles el juego de "Hruska". Una partida de Nivel $n + 1$ "Hruska" consta de cinco rondas de Nivel n. El ganador de cada partida de Nivel n se adjudica el tanteo de Nivel n, mientras que los otros dos jugadores reciben el mínimo (0, 1/3, o 2/3) de sus posibles tanteos a ese nivel. Los cinco números de Nivel n así obtenidos se suman, dando los totales de los tres jugadores; el que tenga la puntuación intermedia gana. En realidad, nada hay de sacrosanto en que cada partida de Nivel $n + 1$ haya de constar de *cinco* rondas de Nivel n; la anchura del nivel pudiera ser cuatro o incluso dos. Es preciso evitar los múltiplos de tres, porque tras cada tanda de tres rondas todos los jugadores tendrán puntuaciones enteras, posibilitando entonces los empates. Tomando anchuras muy pequeñas, por ejemplo, dos, es mucho más fácil jugar partidas de "Hruska" muy "profundas", es decir, de muchos niveles. Por ejemplo, con anchura dos, una partida de "Hruska" a nivel cinco requiere solamente 32 rondas de Nivel Cero, mientras que con la anchura "normalizada" de cinco rondas por nivel, para alcanzar una profundidad de sólo tres niveles se requieren 125 rondas de Nivel Cero.

Tampoco hay nada sagrado en que el campo de valores a elegir en el Nivel Cero tengan que estar acotados superiormente por 5. ¡Los valores a elegir podrían ir desde 1 hasta infinito! Esta sería una de las muchas posibles variantes de "Hruska". Puedo dar testimonio de que la estrategia de juego, incluso a Nivel Dos, rápidamente se torna confusa. He jugado a Nivel Tres en un par de ocasiones, y en ambas el juego ha escapado por completo a mi control. Ello me resulta a un tiempo fascinante y frustrante. Pensemos, sin embargo, en las implicaciones con respecto a la política mundial si incluso juegos tan sencillos como éste se vuelven enseguida desconcertantes. ¡Cuánto más complejos no serán los "juegos" de regateo político, faroleo y amenaza, e incluso guerra, que se desarrollan a nivel internacional! Todas las mañas y ardides que he comentado tienen su contrapartida en política internacional, sólo que "elevadas al cuadrado", por así decirlo. Al ver interpretar estos temas de trascendencia enorme en el escenario del mundo no podemos evitar sentirnos como una célula individual de un mastodóntico organismo, que hace largo tiempo quedó estabilizado en su estrategia evolutiva, cuyas consecuencias sólo podemos observar, esperando que todo salga bien.

Taller y laboratorio

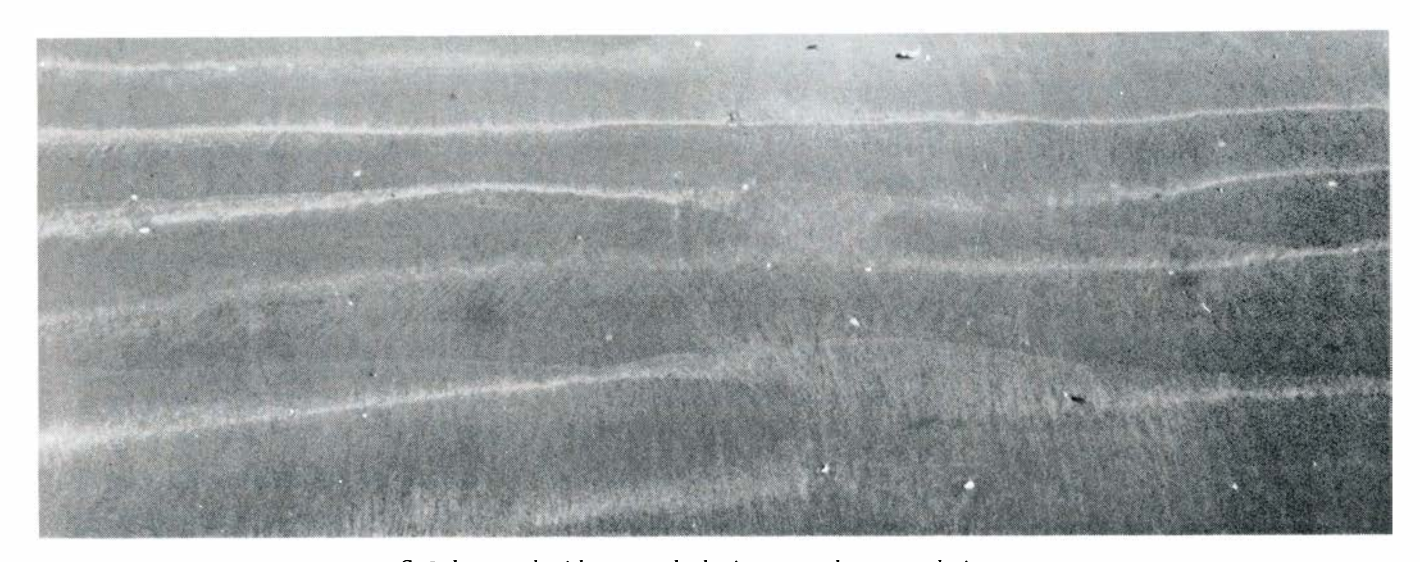
Un paseo por la orilla del mar, para contemplar las olas y discurrir sobre la formación de las playas

Jearl Walker

Paseando por una playa, todo observador atento descubrirá las numerosas señales que deja el agua en su movimiento de aproximación y alejamiento de la orilla. Verá las diminutas marañas que talla el oleaje al morir en la orilla y las grandes medias lunas que excavan las olas a su arribada. Verá, además, el movimiento incesante e infinitamente variado del propio oleaje.

¿Por qué las olas se mueven en todas direcciones en aguas profundas y, al acercarse a la playa, adquieren una misma dirección de movimiento que resulta ser, más o menos, perpendicular al litoral? La explicación arranca del hecho de que la velocidad de las olas decrece tan pronto penetran en las aguas someras contiguas a la orilla y comienzan a "tocar fondo". Entonces, una ola que llegue a aguas someras en dirección no perpendicular al litoral comenzará a refrenarse por su extremo más próximo a la orilla, mientras que el resto continuará desplazándose a mayor velocidad y, como consecuencia, sufrirá un viraje tal que su dirección de propagación tenderá a colocarse perpendicular al litoral. En otras palabras: la ola se refracta.

Otro hecho a observar es que en aguas profundas las olas poseen un per-



Señales producidas por el oleaje entre pleamar y bajamar



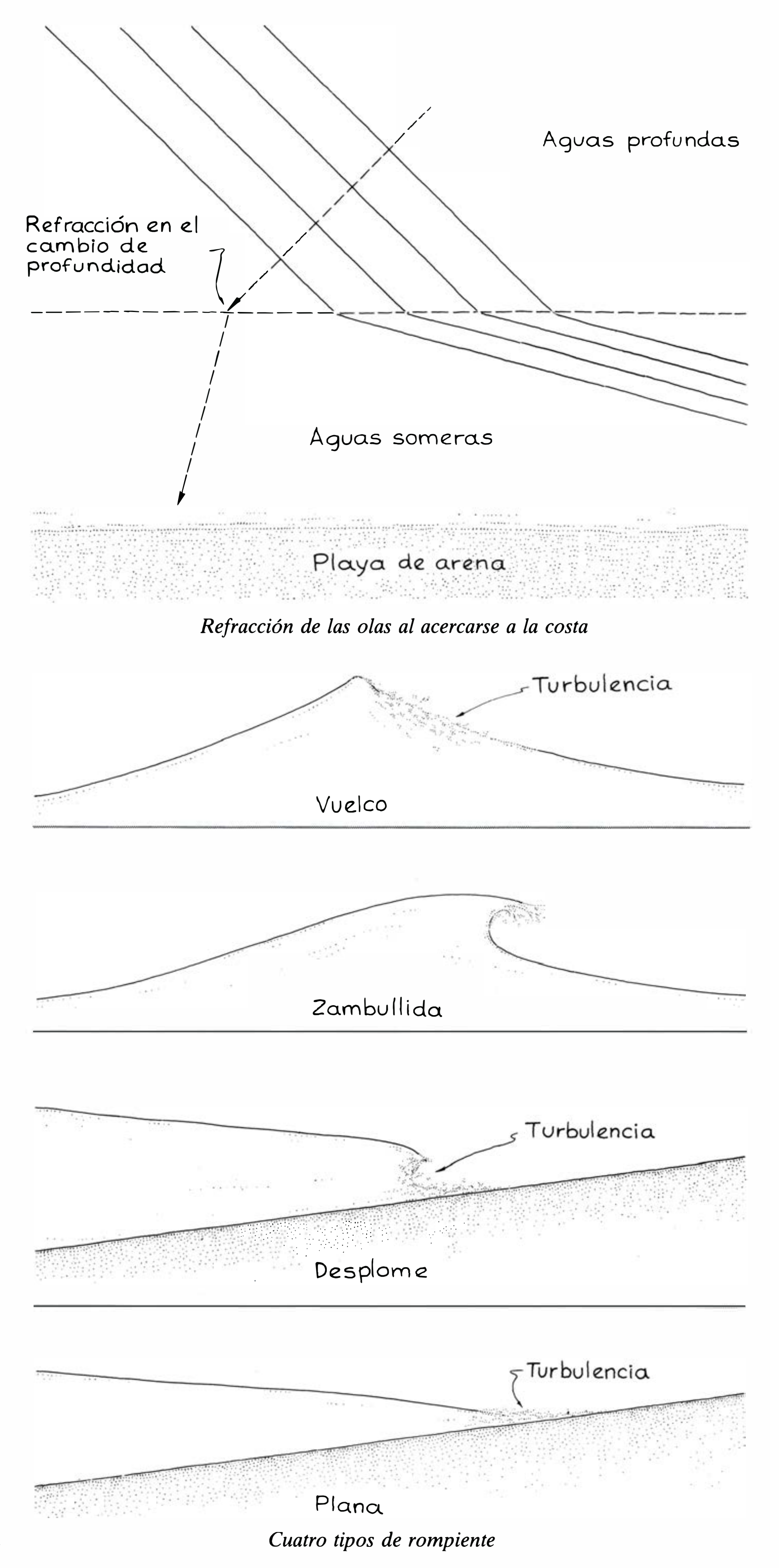
Dibujos intrincados en la arena debidos a la marea en retroceso

fil ondulante casi uniforme, mientras que, en aguas someras, exhiben formas variadas. Pueden identificarse cuatro grupos de olas rompientes. En primer lugar tenemos los llamados vuelcos, en los que la ola retiene la forma primitiva mientras por su pendiente frontal se desliza una capa de espuma. Vienen luego las rompientes en zambullida, que se generan cuando la cresta de la ola rebasa a la base y cae por delante de ésta formando una cortina de espuma y agua. (A los practicantes de *surf* les resultan especialmente gratas estas rompientes, pues les permiten maniobrar con la tabla para correr bajo la cortina de agua en zambullida.) En tercer lugar están los desplomes de ola, en los que ésta se descompone en espuma y turbulencia por delante de la cresta. Cuarto y último: en la mareta las olas ascienden por la pendiente de la playa sin violencia y con escasa turbulencia.

He tenido ocasión de examinar playas y olas rompientes en dos lugares: en el litoral de Charleston y Kiawah Island, Carolina del Sur, y a orillas del lago Erie, junto a Cleveland. En Carolina del Sur se me unió Mary Golrick. Descubrimos que muchas olas presentaban a la vez varias de las características de las rompientes. Por ejemplo, parte de una ola podía volcar, y zambullirse otro tramo; o bien, en una ola que volcara podía iniciarse un desplome o una ola plana de mareta. Hubo puntos donde observamos que el aspecto de las olas variaba de una a otra, cabe suponer que a causa de que su altura cambiara y también la velocidad del viento. En otros lugares la forma de las olas era más uniforme, probablemente porque la configuración del fondo determinase el tipo de rompiente predominante.

Muchas veces alguna ola que se elevaba playa arriba se desplomaba o zambullía, creando un muro casi vertical de agua muy turbulenta. Durante algunos instantes esas olas trepaban playa arriba, rápidas y ruidosas, para perder luego bruscamente energía y aminorar su velocidad. Tales olas eran ejemplos del tipo de ondas solitarias llamadas macareos o barras de agua, que no son sino casos de resalto hidráulico, tal como les expuse en junio de 1981.

Lo que sucede ahí es que, tan pronto un golpe de mar se aproxima a la playa, su velocidad se hace mayor de la que es físicamente capaz de desarrollar una ola que viaje por la superficie del agua. Este régimen de movimiento se llama supercrítico, el cual se descarga a subcrítico a través de una transición repentina, en la que se eleva el nivel del agua

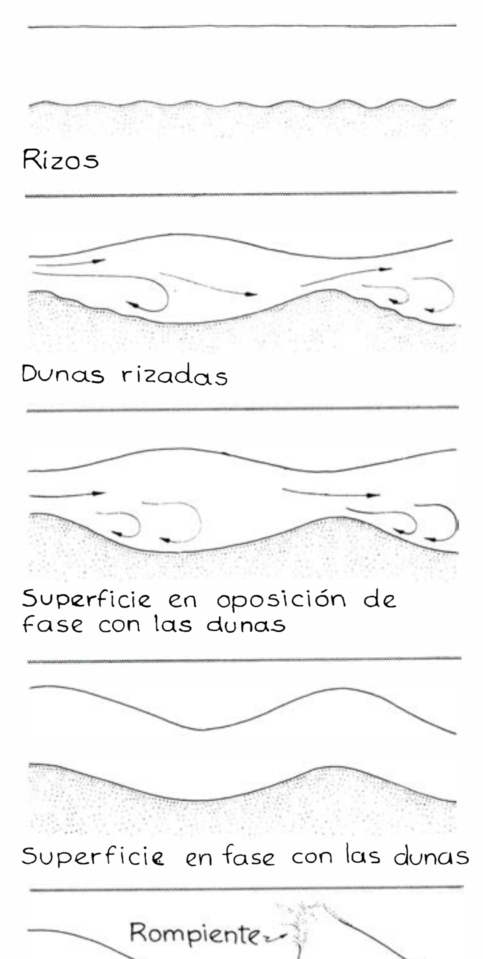


Refracción de las olas al acercarse a la costa

Cuatro tipos de rompiente

para que ésta pueda moverse con mayor celeridad. Esta transición se produce porque el régimen supercrítico es inestable frente al gran número de perturbaciones que introducen las irregularidades de la arena del fondo, y surge ruidosamente playa arriba en forma de muro vertical cuya energía se disipa en el declive de la playa.

Hasta las relativamente mesuradas olas de mareta que Golrick y yo observamos se tornaban en barras al avanzar por la playa. El muro vertical, empero, no solía exceder de un centímetro de altura. Delante suyo se veía una capa de agua menos profunda contra la que parecía empujar. En esa capa se observaban pequeñas ondas separadas un centímetro, o menos, o sea, con una longitud de onda del mismo orden de magnitud, y que parecían inmóviles respecto al muro vertical. Esas olitas podrían deberse al viento o a las irregularidades de la playa, pero en su mayoría eran una manifestación de la inestabilidad asociada al régimen supercrítico y, por ello, formaban parte de la barra.



Ondas en la arena

Toda ola parece retroceder a mayor velocidad que asciende, tras alcanzar el límite superior de su carrera en la playa. Esta impresión nos resultó imposible contrastarla cronometrando el movimiento con la precisión debida, pero la sensación que nos producía el agua discurriendo en torno a nuestros pies parecía sugerirnos que esa sospecha correspondía a la realidad; además, las olas, al bajar, removían alrededor de nuestros pies más arena que al subir.

A veces, el agua de retroceso exhibe la súbita variación de profundidad característica de las barras. Toda capa de agua que descienda por el declive de una playa sufre la aceleración de la gravedad y el régimen puede pasar a supercrítico y, por ello, hacerse inestable frente a las perturbaciones que introduzca el fondo de arena. Las ondas generadas por las perturbaciones crean el súbito incremento de profundidad que señala la transición repentina a flujo supercrítico.

Era interesante observar el encuentro de un flujo saliente con una ola entrante. Aun en el caso de barras entrantes vigorosas, el resultado era casi siempre un empate; y el agua de retroceso, o resaca, agotaba la energía de la barra, quedando ésta reducida a una modesta olita, salvo cuando una barra nueva la atrapaba por detrás.

Un rasgo intrigante del agua de resaca es que en ella aparecen ondas de capilaridad. Estas ondas están regidas por la tensión superficial y no por la gravedad. A Golrick y a mí nos costó cierto esfuerzo rastrearlas porque son más veloces y, también, porque no se ven fácilmente, a no ser que reflejen la luz bajo un determinado ángulo. Tengo la impresión de que las ondas de capilaridad raramente poseen más de tres o cuatro crestas. Su velocidad es superior a la del frente de agua que retrocede desde la orilla; suelen moverse en otra dirección. Desconozco su origen, pero me atrevería a decir que provienen de rachas de viento o de alguna irregularidad en la arena.

Salvo en las zonas someras contiguas a la playa, todo volumen de agua dado asociado a una ola carece de movimiento global. En aguas profundas ese volumen ejecutará un movimiento circular vertical cuando la ola lo atraviese. Más cerca de la playa, el movimiento es elíptico con el eje menor vertical. Junto a la playa, no obstante, se producen brincos en las capas de agua que avanzan o retroceden. Estos brincos arrastran granos de arena con el movimiento de la capa de agua. Observando atentamente una resaca apacible, me fue posible seguir la evolución de los granos al ser recogidos, arrastrados y abandonados en el fondo.

La resaca, al discurrir alrededor de un pequeño objeto enterrado en la arena, vacía un hueco de corta longitud en dirección al mar. El hueco que se formó tras una concha que enterré en la arena tenía unos dos centímetros de longitud; el agua saliente había adquirido turbulencia suficiente para elevar los granos de arena y arrastrarlos aquella distancia.

Las olas dejan en la arena múltiples y variados dibujos. En la bajamar Golrick y yo descubrimos huellas de forma cóncava desigualmente distribuidas, y con la concavidad hacia el mar. Esas huellas delimitaban el alcance máximo de las olas que habían llegado a la playa durante la pleamar. Cada ola arrastra consigo arena en su recorrido por la playa; arena que deposita en el punto de su máximo alcance antes de retroceder. Mientras la marea asciende, la resaca borra la mayoría de esas líneas; pero, cuando empieza a retroceder, sobre la playa queda un conjunto de señales que marcan el alcance de las olas.

En ciertas playas, entre una huella de alcance de ola y el mar quizá sea posible descubrir unas señales más pequeñas en forma de diamante que deja la resaca. Willard Bascom trata de ellas en su libro *Waves and Beaches: The Dynamics of the Ocean Surface*, que constituye una fuente de información inestimable para todo estudioso de la física de las playas. En su opinión tales huellas las origina la resaca en las playas dotadas de un buen declive. Si éste es suave, la lentitud de la resaca impide que excave tales valles en miniatura, pero aun así podrán descubrirse líneas pequeñas e irregulares que apunten más o menos hacia el mar.

En las playas de arena aparecen gran número de pequeños abultamientos, a modo de cúpulas o domos, que forma el agua embebida por la arena. Efectivamente, antes de la llegada del agua, los espacios comprendidos entre los granos de arena están casi todos llenos de aire, al cual impulsará hacia arriba el agua cuando ésta se hunda en el suelo a través de pequeñas aberturas. Estas suelen ser localizables por las burbujas que crea el aire saliente en el seno del agua circundante.

Se forma un domo cuando un conjunto de capas de arena sucesivamente más profundas resulta afectado por el agua de hundimiento. Una primera ola humedece una capa de arena próxima a la superficie. Luego, si pene-

tra más agua procedente de olas posteriores, el aire que se encuentre en las zonas de arena más profundas quedará atrapado por la capa superior de arena humedecida. Entonces, el agua que se infiltre entre los granos de la arena más profunda aumentará la presión del aire retenido, y éste empujará la superficie de la arena formando un domo.

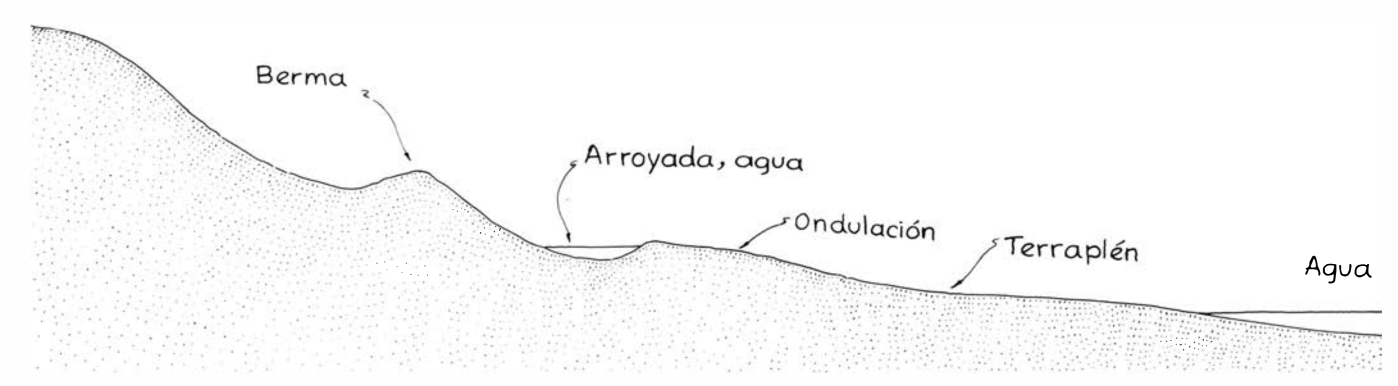
Tanto en la zona húmeda de la playa ya abandonada por la marea, como en la que aún están barriendo las olas, se descubren sistemas de ondas de arena con longitudes de onda del orden de centímetros. Son éstos estructuras complicadas nacidas del movimiento del agua, al que a su vez alteran. Bascom describe dos tipos. En uno de ellos, el movimiento del agua hace que oscilen las crestas de las ondas de arena, desplazando en vaivén los granos en el seno de la onda. En el segundo tipo las crestas permanecen casi estacionarias y, el agua, cuando pasa por ellas, levanta torbellinos en los senos. Se puede observar la decantación de los granos de arena de un torbellino a la vez que desciende el nivel del agua de retroceso.

El agua que queda en un seno suele drenarse a lo largo de la longitud del mismo, ya que las ondas de arena rara vez son exactamente perpendiculares a la pendiente de la playa. La brisa envía multitud de ondas de capilaridad a lo largo de los senos llenos de agua. Estos posibilitan la visión de las ondas de arena, aunque sean someras, ya que las crestas sobresalen por encima del agua que discurre por ellos.

La forma de las ondas de arena depende de la rapidez del oleaje. Su abanico se extiende desde pequeñas ondulaciones hasta grandes dunas. Las dunas modifican la corriente de agua. Cuando las ondas de agua están en oposición de fase con las dunas, el agua que discurre sobre una de éstas se transforma en un vórtice que se abre paso hacia el valle existente entre esa duna y la siguiente. A causa del movimiento del agua, las formas de las dunas son irregulares. Cuando las ondas que forma el agua en movimiento están en fase con las dunas, la forma de éstas es más lisa y redondeada.

A mayor escala, cualquier playa normal suele mostrar variaciones de altura superpuestas al declive que conduce al mar. Esta estructura se aprecia mejor en la bajamar. En la parte superior de la playa están las dunas que definen el límite más alto de la misma. Por debajo de ellas, la arena forma una pequeña elevación, llamada berma, que señala el alcance del agua en la pleamar. En la





Configuración de una playa

bajamar, entre la berma y el mar puede extenderse otra ondulación de arena; y entre ésta y la berma quizá se vea una pequeña charca de agua, que es la arroyada. Desde la ondulación hasta la línea de bajamar puede correr un terraplén de arena.

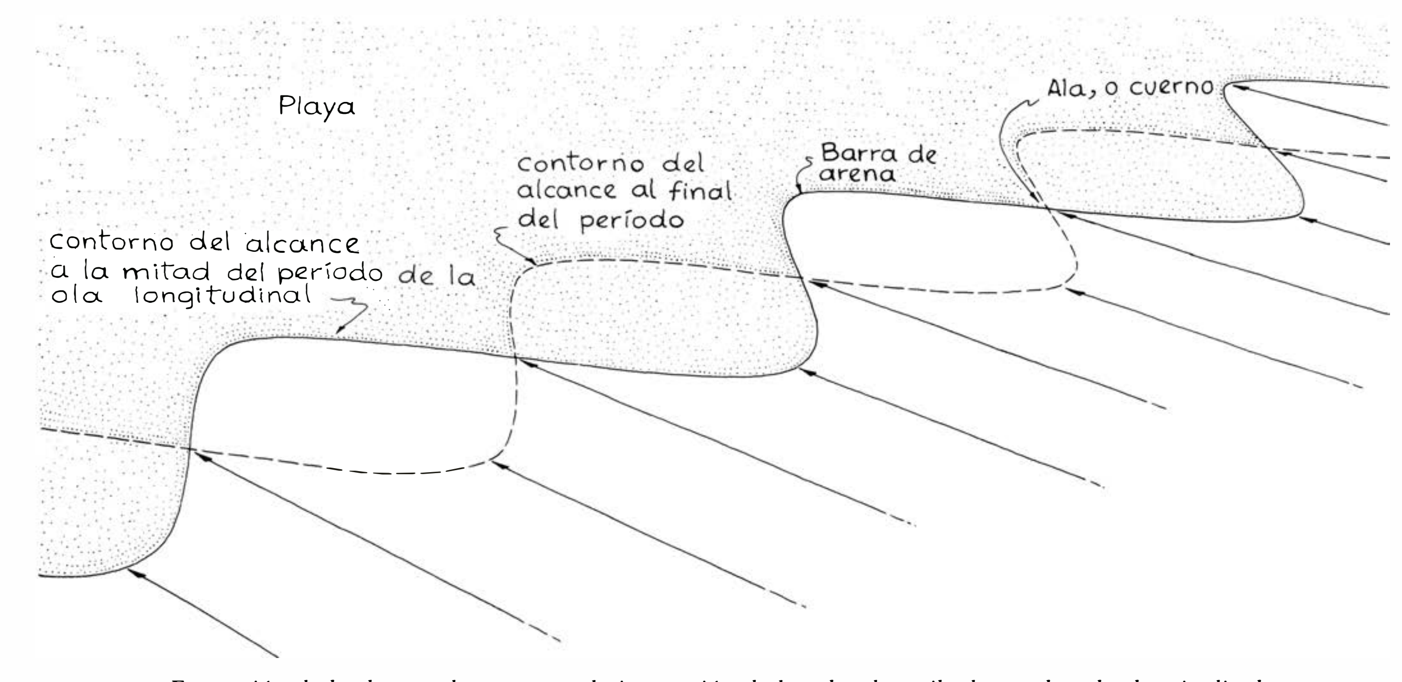
La creación y destrucción de esos relieves es tema que preocupa muchísimo a los expertos que se ocupan de la erosión de las playas. Una tempestad fuerte probablemente los altere radicalmente; pero, aun sin tempestades, las mareas los modifican poco a poco.

Las playas que rodean al lago Erie no muestran los efectos de la marea y parecen afectarles más las tormentas que el movimiento gradual de la arena ascendiendo por la ribera. En un punto de ésta, cercano a Cleveland, el fondo del lago cae abruptamente a sólo un metro aproximadamente de la línea de alcance máximo de las olas. Estas dejan una ondulación de arena más estrecha pero más prominente que las de Kiawah Island. No descubrí arroyadas junto al lago, aunque los detritos de pleamar tierra adentro de la ondulación parecen indicar que, a veces, las olas llegan más allá de ésta.

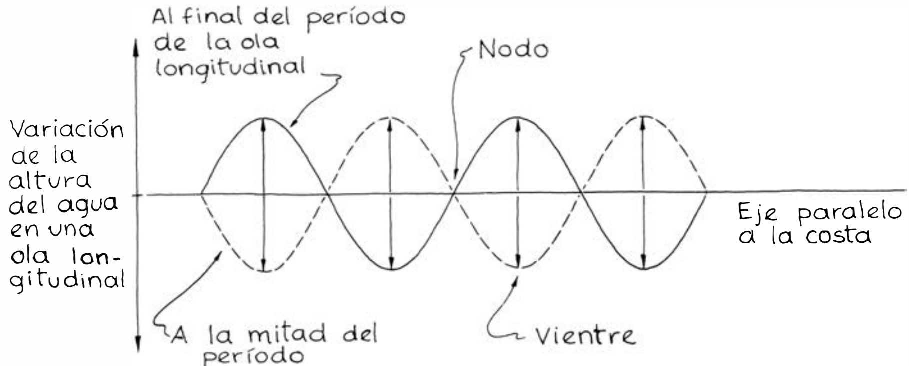
En muchas playas se ven barras de arena, que constituyen uno de los efectos más bellos y extraños que puedan darse en ellas. Una barra de arena se forma a base de una capa de agua muy fina que traza una curva horizontal a la vez que barre el declive de la playa. Entre una barra y la siguiente aparece una porción de playa que describe una curva en sentido contrario. Su diámetro varía entre menos de un metro, a orillas de un lago, hasta 100 kilómetros, o más, en el caso de costas marítimas. Estas últimas son formas a gran escala, conocidas también por barras gigantes o ritmos costeros. Por causa de su espaciado irregular, en según qué puntos no es raro que no caigamos en ellas; pero en otros lugares, su periodicidad es tan precisa que la orilla parece artificial.

Bascom explica que las barras de arena mantienen su forma merced a la interacción de dos olas que incidan consecutivamente sobre la orilla. La primera de ellas penetra en una barra ya existente arrastrando consigo una cantidad de arena. Entonces, esa ola se divide de modo que la arena es transportada al borde interno de la barra. Durante la resaca, el agua fluye hacia el centro de la barra, cuya forma cóncava la canaliza hacia el mar.

En la desembocadura de dicha concavidad la segunda ola, a su llegada, se ve refrenada por la resaca, mientras que por las alas de la barra avanza prác-



Formación de las barras de arena por la interacción de las olas de arribada con las olas longitudinales



Variaciones de una ola longitudinal paralelamente a la costa

ticamente sin impedimento. Por tanto, podrá acarrear más arena y depositarla a lo largo del borde interno de la barra. Este proceso continúa con las olas sucesivas.

Hasta hace poco se desconocían los orígenes de la periodicidad de las formaciones en barra de arena a lo largo de las costas. Actualmente, varios investigadores, entre ellos Anthony J. Bowen, de la Universidad Dalhousie, y Robert T. Guza y Douglas L. Inman, de la Institución Oceanográfica Scripps, la atribuyen a las olas longitudinales, que son olas que se generan junto a la orilla por acción de otras olas provenientes de aguas profundas.

Tal como se representa en la ilustración superior de esta página, la altura de las olas longitudinales varía a lo largo de un eje paralelo a la costa. Los puntos de altura máxima y mínima son vientres y entre éstos se encuentran los nodos, puntos en los que no varía el nivel del agua. (En la ilustración se representan únicamente las variaciones de altura debidas a las olas longitudinales; ya que en una playa las variaciones debidas a las olas procedentes de aguas profundas se superponen a las longitudinales para dar las diferencias que se observan en la altura del agua.)

Vista en sección transversal a lo largo de un eje perpendicular a la orilla, una onda longitudinal está constituida por varios modos que representan variaciones de su amplitud; éstos se muestran en la ilustración inferior de esta misma página. En su modo más sencillo, la amplitud de la ola longitudinal decae ininterrumpidamente en dirección al agua profunda; este es el modo cero. Voy a centrarme en él, ya que parece el máximo responsable de los relieves que crean en las playas las olas longitudinales.

Resulta difícil observar a veces las olas longitudinales en las playas naturales, porque las olas procedentes de aguas profundas varían muchísimo de forma, tamaño y dirección, sin olvidar las irregularidades del fondo. Para simplificar las cosas Guza e Inman hicieron sus ensayos en Scripps con olas longitudinales que creaban en un estanque. Para simular la playa emplearon un tramo inclinado de hormigón y para generar las olas de aguas profundas se valieron de un émbolo.

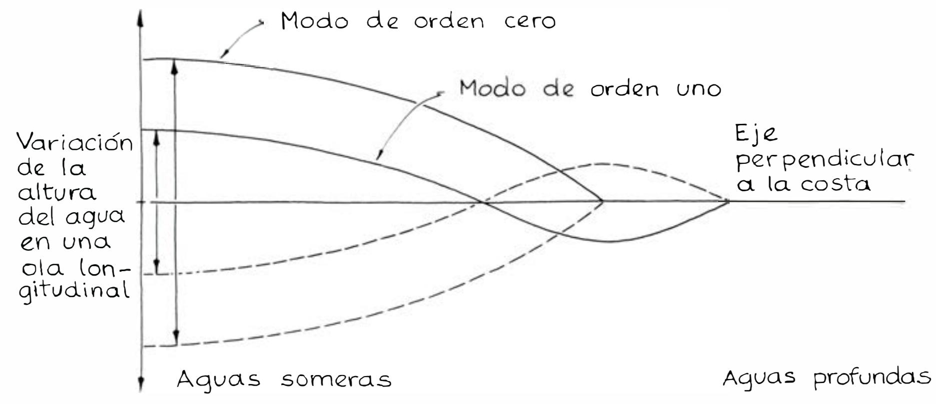
El alcance de las olas procedentes de aguas profundas era siempre el mismo en los nodos de las olas longitudinales. En un vientre dado el alcance variaba periódicamente, siendo máximo cuando la ola ascedente estaba en fase con el nivel máximo de la ola longitudinal, y mínimo cuando ambos estaban en oposición de fase.

Como el período de las variaciones de altura de las olas longitudinales era doble que el de las olas de aguas profundas, observaron que la interferencia constructiva se alternaba con la destructiva. Así, cuando una ola de aguas profundas que llegaba a un vientre determinado interfería constructivamente con la ola longitudinal, dando una carrera larga, la siguiente interfería destructivamente y la carrera era corta. Como esa interferencia periódica tenía lugar en todos los vientres a lo largo de la orilla, el límite entre el hormigón húmedo y el seco tomaba la forma de una sucesión de contornos de medias lunas centradas en los vientres. Los cuerpos de estas medias lunas marcaban los nodos.

Para imitar una playa erosionable Guza e Inman cubrieron el hormigón con una capa delgada de arena fina, añadiendo más conforme se desarrollaban las olas longitudinales. En los vientres de éstas, el chapoteo del agua erosionaba la arena. En cada carrera máxima la arena se elevaba y quedaba en suspensión para volver a depositarse luego en la zona de los nodos. De inmediato aparecieron las características formaciones en media luna propias de las barras de arena y, pasado un tiempo, los cuernos de las medias lunas se alargaron hacia el agua más profunda y su altura creció.

A medida que se añadía más arena, ésta se concentraba cada vez más en el centro de la barra, donde el flujo del agua era menos vigoroso. Al poco rato, cada una de las barras se dividía en dos, duplicándose así la periodicidad de las barras a lo largo de la orilla. Esta organización de una periodicidad pequeña superpuesta a otra predominante de mayor envergadura puede observarse igualmente en algunas playas naturales.

Al ir añadiendo todavía más arena, comenzó a desintegrarse la agrupación de barras. Evidentemente, las formaciones de arena comenzaron a interferir con las olas procedentes de aguas profundas y con la capacidad de éstas para generar olas longitudinales. Posiblemente lo que suceda en una playa real es que las olas afluentes inyecten energía a las olas longitudinales, hasta que éstas hayan redistribuido cierta cantidad de arena. Luego, cesa la transferencia de energía y desaparecen las formaciones de arena.



Variaciones de una ola longitudinal perpendicularmente a la costa

Libros

Coseriu, física nuclear, teoría de la geografía y fisiología vegetal

R. Cerdà, L. J. Boya, J. Vilà, J. P. Martínez y E. Herrero

FUNCIONALISMO ESTRUCTURAL Y GENERATIVISMO, por Víctor Sánchez de Zavala. Alianza Universidad, Madrid, 1982, 216 páginas. Al abordar este libro es preciso sentar algunas importantes salvedades para no distanciarse demasiado de una cabal comprensión. Por de pronto, el título mismo es ampliamente engañoso o exagerado (acaso por imperativos editoriales), ya que promete o al menos induce a esperar un cotejo teórico de gran alcance y, en realidad, se limita a examinar minuciosamente gran parte de la obra más divulgada de Eugenio Coseriu. Otra posible sorpresa proviene de la enorme cantidad de material contenido en las 200 páginas largas del libro. En efecto, en una apretadísima y microscópica tipografía –pero no farragosa, dicho sea de paso–, distribuida de una manera un tanto aleatoria en texto principal y en centenares de notas al pie, se enrosca y desenrosca una extensa argumentación cuya indiscutible calidad queda, además, empañada por constantes erratas de todos los calibres. Parece lícito, incluso, suponer que en el ritmo premioso y en extremo detallado de la redacción han saltado de vez en cuando los efectos de una precipitación perniciosa y paradójica que culmina en las repetidas llamadas a posiciones más explícitas o conclusivas en S. de Z. (1980), esto es en la segunda edición de S. de Z., *Hacia una epistemología del lenguaje: cuatro ensayos*, Alianza, Madrid 1972 (reiteradamente citado como S. de Z. (1971)), edición que, en el momento de publicarse la obra objeto del presente comentario, S. de Z. (1982), no ha visto todavía la luz. (Además, tampoco parece lógico que el añadido en cuestión exceda en espacio y concentración conceptual al propio S. de Z. (1982).)

Lamentablemente, no puede pasarse por alto que la razón última y los antecedentes del libro se hallan en un enfrentamiento que, al menos en forma explícita, se remonta a S. de Z. (1972) y que se ha desencadenado no sólo por discrepancias más o menos radicales, sino también por actitudes de menosprecio, generales o personales, que cada contendiente atribuye a su adversario. Echese, si no, un vistazo previo, recomendable y esclarecedor, a los correspondientes pasajes de S. de Z. (1972, 243-5) y Coseriu, *Tradición y novedad en la ciencia del lenguaje*, Gredos, Madrid, 1977, 358-60, nota 177. En consecuencia, todos los razonamientos del libro, las dosificaciones, las insistencias y la ordenación de los hechos están presididas por el afán de mostrar insuficiencias, limitaciones, incoherencias, contradicciones y, en todo caso, sinrazones atrabiliarias e injustas contra las teorías generativistas en el pensamiento de Coseriu. La razón, en última instancia, está en los hechos mismos y como, a la postre, la disputa es epistemológica en su mayor parte, hay mucha lingüística en el libro, que es lo que, en definitiva, importa y lo salva.

El planteamiento inicial resulta especialmente maniqueísta y a menudo tendencioso, tanto en lo que se afirma como en lo que se implica. La división entre los buenos generativistas, ignorados, cuando no acosados y recluidos en catacumbas, y los malos estructuralistas, detentadores de celebridad, parabienes y cátedras, vale, a lo sumo, como caricatura de la inercia administrativa de un sistema educativo, cuyos polos se podrían alterar en otros pagos, pero no tanto para la finalidad reivindicativa con que S. de Z. justifica el supuesto interés social de su "denuncia". Se le va la mano, sobre todo, cuando opone al monolitismo intransigente del estructuralismo (coseriano) no sólo la longanimidad del generativismo, sino también, nada menos, una exclusiva en la autocrítica, con lo que postula la existencia de una entidad tan asombrosamente proteica que puede cambiar cuanto quiera sin dejar de ser ella misma. En otras palabras, el principio de la contradicción sólo se aplica, rigurosamente, en Coseriu, pues si, por el contrario, alguien muestra alguna deficiencia en la teoría generativista, no hace más que mejorarla siendo consecuente con el generativismo mismo dentro del propio generativismo (págs. 13, 46-7). Alguien de fuera o de dentro; no importa, con tal que no sea, por ejemplo, Coseriu. Sin que se aclare del todo, parece que el autor atribuye esencia o existencia, según el caso, al generativismo (al que alude con otras denominaciones que omito para simplificar), pero no ambas cosas a la vez.

Las caricaturas podrían llevarse, desde luego, más lejos sin perder un ápice su carácter ejemplar y moralizador. Por un lado, podrían incorporarse los innumerables seguidores de Coseriu que repiten ciertas ideas suyas con estéril insistencia, cuando no con evidente desatino. O, por otro lado, los generativistas que explotan sistemáticamente la precaria traductibilidad de los ejemplos del inglés a otras lenguas o aun aquellos, algo más avanzados, que van de un constructo teórico a otro en busca de una salida plausible para la maraña formal que han urdido ellos mismos sin reparar en consecuencias, como en busca de esos productos cosméticos, únicos y peculiares, que eliminan los efectos de otros de aplicación previa e idéntica manufactura y que siempre dan un poco que pensar al que no es ferviente usuario o fabricante de afeites. Evidentemente, nada de esto constituye indicio alguno para concluir sobre la inutilidad o la infecundidad intrínseca de las ideas de Coseriu o de Chomsky. Ni tampoco faltan lingüistas que dan fe de ello entre nosotros y, lo que es más necesario, que son escarmiento de diletantes y freno, sin recurrir forzosamente al vituperio expreso, para las poco meditadas incursiones de figuras acostumbradas a sentar sus reales impunemente y por doquier. Y para mí, S. de Z. es uno de los escasísimos lingüistas genuinos con que cuenta España en estos momentos, del que por definición, pues, proclamo su auténtica valía.

Ahora bien, para dejar de una vez estos aspectos de enfoque ni demasiado esenciales ni demasiado marginales en el libro, pero llenos de matices trascendentes, entiendo que vale la pena destacar el valor ilustrativo de las continuas referencias a Coseriu por medio de expresiones tan pintorescas como "el lingüista de Montevideo", "el egregio profesor de Tübingen" y otras del mismo talante. A mi juicio, estos apelativos no sólo reflejan la apariencia tensa y reticente del discurso, sino también la retórica tremendamente conceptualista del estilo que emplea habitualmen-

te el execrado y ofendido estudioso de la Villa y Corte. Uno tiene la impresión de ver proyectadas volutas y espirales coruscantes contra la tracería rectilínea de Coseriu, pero cuando se acostumbra a ello (¿horror al vacío?), a fuerza de releer muchos párrafos, no es del todo imposible descubrir que las cosas, en S. de Z., intentan describirse siempre de una manera cuidada, concisa y sobre todo completa, lo que con frecuencia conduce a una aparente y aun real prolijidad.

El libro está minuciosamente estructurado, como si la ira santa de su autor no hubiese sido óbice, sino todo lo contrario, para planear un ataque demoledor y, de paso, un manifiesto inexorable contra un estado de cosas. De sus tres partes principales, las dos primeras se dedican a exponer críticamente el pensamiento general de Coseriu, distribuyéndolo en dos períodos cronológicos, antes y después de 1957. Sólo que esta fecha apenas contiene ningún sesgo específico en la trayectoria de aquel lingüista, tanto si se examinan los incompletos datos bibliográficos suministrados (cuyos años hay que manejar con reparos), como si se observan otros datos cualesquiera de su vida y obra. Falta, por ejemplo, algo tan básico como E. Coseriu y H. Geckeler, *Linguistics and semantics*, publicado en T. A. Sebeok (compilador), *Current trends in linguistics*, vol. 12, Mouton, La Haya, 1974. En rigor, lo único que el año 1957 representa, con la edición europea de las *Syntactic structures* de N. Chomsky, es el advenimiento del generativismo *in limine* y, con él, de la nueva inspiración. O de la nueva era, vamos. Parece, entonces, como si S. de Z. considerase imputable la mera omisión de respuestas inmediatas y positivas a tamaño acontecimiento, sobre todo si se tiene en cuenta que en diversas ocasiones escruta la filiación de Coseriu a la fenomenología de E. Husserl y no sólo insinúa que cometió con ello una mala decisión, sino que encuentra su versión, además, insuficiente. ¿Y quién asegura que se trataba, precisamente, de dar una versión completa? Esta suerte de conclusiones adolece, como mínimo, de una irreparable descontextualización, pues S. de Z. tampoco llega a preguntarse, por ejemplo, si la interpretación fenomenológica de Coseriu (1954a) representó, o no, en su tiempo una clarificación sobre las relaciones conceptuales entre sonidos y fonemas. Y, sin embargo, más adelante (página 87) censura el reproche que éste hace a Chomsky por omitir la distinción cartesiana entre conocimientos claros y distintos porque, a juicio de S. de Z., esta distinción no aporta nada nuevo.

En la tercera parte, se examina la crítica coseriana contra el generativismo en distintos planos, descriptivos y explicativos. Aquí se confirma que, a salvo de otras muchas consideraciones posibles, las apetencias de Coseriu y del generativismo en sus variedades más familiares tienden a instalarse en esferas distintas de interés; que Coseriu, si se me permite otra licencia gráfica, avasalla más que incita y que, acaso por esto, difícilmente se sabrá si algunas de sus propuestas –la comprehensión del saber lingüístico total, la articulación del significado léxico en significado oracional, etc.– son utópicas o simplemente lo parecen, a menos que él mismo las desarrolle. Todavía falta mucho por ver, afortunadamente. La conclusión de S. de Z., a su vez, apunta que Coseriu sabe lingüística –válganos Dios–, pero ignora (agentivamente: hace que no sabe que existe) la bibliografía generativista y la historia de este movimiento, carece de fundamentos epistemológicos e ignora (no agentivamente: no sabe que existe) la realidad. Sin comentarios.

En todo caso, es imposible discurrir por las páginas del libro sin encontrar a cada paso innumerables motivos de reflexión en el sentido más diverso y sugestivo que pueda darse. Y aun así, me temo que las cosas no serán muy distintas después de como fueron antes. Lo dicho: a ver. (R. C.)

GROWTH POINTS IN NUCLEAR PHYSICS III, por P. E. Hodgson. Pergamon Press, 1981. Este tercer volumen de la serie "Growth Points in Nuclear Physics" recoge una treintena de artículos sobre algunos temas de estructura nuclear del conocido profesor de Oxford. El propósito de la serie en su conjunto es presentar revisiones "instantáneas" de las novedades más interesantes que aparecen en física nuclear, objetivo que se pretende cumplir destacando más la información descriptiva y cualitativa, con una abundante bibliografía, que los análisis cuantitativos, los resultados de los cuales, sin embargo, se ofrecen resumidos en forma de una copiosa colección de gráficas y tablas. Los artículos se publicaron antes en revistas generales de ciencia como *Nature, New Scientist* o *Physics Bulletin*, o son fruto de comunicaciones a reuniones científicas, lo que indica que nos encontramos frente a unas puestas a punto generales, no ante un trabajo de vanguardia absoluta para los conversantes en la materia. Los trabajos son más bien cortos, salvo cuatro o cinco, y dan una idea somera de los avances recientes en un campo especializado, y serán por ello más útiles para el estudioso de lo nuclear en general que para el profesional muy especializado.

Los temas seleccionados para este tercer volumen se refieren a tres materias: estudios sobre *estructura nuclear* (12 contribuciones), con revisiones sobre distribución de carga y masa en los núcleos, modelo de cúmulos alfa, desintegración alfa en relación con las resonancias gigantes, y otros. *Potenciales nucleares* (cuatro contribuciones), donde se exhiben diversos potenciales núcleo-núcleo y núcleo-nucleón adaptados a varias reacciones nucleares, incluyendo desviaciones del potencial convencional de Saxon-Wood. *Reacciones con iones acelerados*, tema de gran actualidad en los principales laboratorios por los nuevos aparatos, que se aborda con cierta extensión (cinco contribuciones de reacciones con iones ligeros y diez con pesados). Aunque el autor cumple seguramente su propósito de ofrecer un puente en el tiempo entre el artículo original y el libro, donde el avance consagrado queda ya reseñado, se echa de menos desde un punto de vista más fundamental, y en relación con los temas abordados, un mayor detenimiento en los niveles excitados, alusión a fuerzas de intercambio por algo más que piones, intervención de fuerzas entre tres cuerpos, etcétera. Confiamos que estas cuestiones puedan ser objeto de atención en otros volúmenes de la serie. (L. J. B.)

FILOSOFÍA Y CIENCIA EN LA GEOGRAFÍA CONTEMPORÁNEA, por Horacio Capel. Barcanova, Barcelona, 1981; Colección Temas Universitarios, 509 páginas. En dos amplios sentidos, por lo menos, esta obra ofrece un marcado interés. El tema de estudio alude directamente a la geografía, una disciplina que se ha movido con frecuencia –quiérase o no– entre las ciencias naturales y las sociales, por lo que puede incidir en aquélla cualquier problema que a éstas afecte. Con mucha más razón en el período estudiado, el contemporáneo, es decir, a partir de finales del siglo XVIII y principios del XIX. Por ello esta disciplina aparece como muy sensible ante un buen número de los diversos cambios acaecidos en el campo de la ciencia en los últimos doscientos años.

En segundo lugar, otra fuente de interés arranca de los mismos enfoques

que el autor da a su estudio, presentando en ocasiones una notable originalidad y novedad. No se trata, en efecto, de una simple historia factual de la disciplina en los dos últimos siglos, a través de ciertos autores, instituciones u obras, sino que hay una preocupación por poner en relación la evolución de la geografía– con más exactitud, de la producción y el pensamiento geográfico –con el decurso de las ideas científicas y con ciertos hechos sociales. Está claro que lo que acabamos de señalar constituye un objetivo prioritario del autor, que recurre explícitamente a la cita de la filosofía y la ciencia en el mismo título de la obra.

Uno de los hechos sociales que se destaca es la formación de unas comunidades de geógrafos, a partir del cultivo de la geografía en las universidades alemanas y francesas, con unas características y unas pautas de actuación que Capel intenta definir. Sorprende un poco que el marco de "producción" de la geografía quede sólo circunscrito, en buena parte, a un contexto de ideas, sean científicas o filosóficas. Quizá no tan en primer plano, pero no por ello menos importantes, otros contextos sociales, en ocasiones apenas señalados desempeñan su papel en la evolución de la geografía: aludo a fenómenos tales como la industrialización, comercialización o urbanización, de claro desarrollo en el pasado siglo y precisamente en los países donde la geografía contemporánea se forma y expande. Hechos, por otra parte, que el autor conoce perfectamente bien.

El tratamiento temático se efectúa a distintos niveles, con algunas desigualdades de información y enfoque, lo que puede provocar cierta desorientación en el lector. Quizá convenga señalar que este hecho puede venir motivado por el mismo desarrollo de la geografía a lo largo de estos dos siglos. En la primera parte se agrupan dos excelentes monografías alrededor de Humboldt y Ritter, huyendo acertadamente de lo biográfico e intentando una exposición y valoración, no siempre fácil, de su pensamiento geográfico. Si, a pesar de todo, se piensa que son los "padres putativos" de la geografía contemporánea, es decir, tenidos erróneamente por tales, no acaba de entenderse la importancia que se les ha concedido (págs. 5-76). En realidad, Capel piensa, con razón, que ambas figuras representan una etapa inicial fundamental de la geografía contemporánea, aunque su "sola existencia... no explique suficientemente el nacimiento y desarrollo" de aquélla. Aparte o junto a Humboldt y Ritter, se produce ya en su época una serie de significativos hechos, algunos de los cuales representan o pueden equivaler o colaborar a una primera y diversa institucionalización de la geografía contemporánea (sociedades geográficas, sociedades comerciales, organismos oficiales estadísticos, etc.), no siempre suficientemente estudiados y valorados. Con todo, las instituciones que podemos considerar fundamentales, las citadas sociedades geográficas, son bien analizadas en su desarrollo y significado en el capítulo VII. Cabría también una mayor información y valoración de la "geografía pura" alemana, a principios del siglo XIX, cuya exacta significación en el desarrollo de nuestra disciplina puede escapar al lector.

Sin embargo, lo que representa evidentemente la gran institucionalización de la geografía contemporánea es sin duda su ingreso y asentamiento en la universidad. Sin que exista un apartado en que se exponga el proceso de conjunto y las características y resultados generales de esta institucionalización, su valor y sentido respecto a la geografía quedan bien claros después del análisis de lo que ocurre en varios países, singularmente en Alemania (cap. III) y Francia (cap. IV). La información facilitada es siempre abundante, incluso a veces rozando el exceso de detalle y erudición, pero en todo caso nunca vana. Aunque, a partir de esta época la geografía se mueve dentro de un nivel universitario, conviene indicar que caben varios sentidos en el reconocimiento de este hecho –un definido "modelo" alemán, por ejemplo, junto a un grupo de geógrafos franceses menos configurado–; o los casos, no carentes de originalidad, de la geografía británica o rusa. La aparición y desarrollo de grupos de geógrafos, la celebración de congresos, la formación de asociaciones, además del ya señalado análisis de las sociedades geográficas, constituyen un exponente del desarrollo de nuestra disciplina desde los últimos decenios del pasado siglo. Queda por estudiar, nos parece, de manera más global y sintética, el proceso a través del cual existe una difusión de las técnicas y conocimientos geográficos a partir de lo que pudiéramos llamar los "centros productores" de la geografía.

Una parte fundamental de la obra, probablemente la esencial, es la dedicada a lo que Capel llama "el curso de las ideas científicas". Enlaza con el objetivo prioritario que hemos tenido antes ocasión de señalar. Después de una presentación y debate previos acerca de la ruptura y continuidad en el pensamiento geográfico, se analizan tres grandes "momentos" de la geografía contemporánea, con la aportación en cada caso de sus contextos filosófico, científico y cultural y con sus concreciones conceptuales y metodológicas dentro de nuestra disciplina. Tres "momentos", decimos: el positivismo, el historicismo y el neopositivismo. La presentación del último decenio es más compleja por razones obvias de cercanía temporal y diversidad conceptual y metodológica, pero el autor no se arredra por ello, aun cuando sabe los riesgos que corre en su exposición y valoración.

Son estos últimos unos capítulos que pueden ser de gran novedad para un buen número de geógrafos y de otros colegas de materias afines. Capel alcanza en diversas exposiciones y comentarios una notable profundidad y abre brillantes horizontes. Para el geógrafo quizá la reflexión sea a veces un poco alejada y no siempre mantenida desde dentro de la materia considerada, quiero decir a partir de nuestra disciplina. Sería interesante conocer, desde el otro extremo, el parecer de los teóricos o filósofos de la ciencia, por ejemplo. En todo caso, para unos y otros, estos capítulos, singularmente desde el X al XII, constituirán una provechosa lectura; imprescindible para nosotros, los geógrafos, en numerosos puntos, por lo menos a mi juicio.

Quizá convenga advertir a los no geógrafos que la presente obra, encuadrada en unos esquemas rigurosos, no aprehende todo el quehacer geográfico. Sin duda alguna es geografía –y otras cosas, por supuesto, como ciencia e incluso filosofía–, pero no es toda la geografía. Supongo que sin pretenderlo y como ocurre en numerosas obras de teoría de la geografía, se comete una cierta parcialidad y reduccionismo, quizás imposible de evitar. A pesar de que en parte se salva la dificultad, si se tiene en cuenta la manifestada continuidad, más o menos mantenida, de las distintas corrientes, está claro que en el cuadro presentado en el último capítulo no queda realmente explícita la magnitud y la diversidad del quehacer geográfico.

La geografía actual representa más, bastante más, que las tendencias conceptuales y metodológicas señaladas. Y aunque el autor lo sabe, quizá convenga advertirlo. Ha de quedar claro que términos como "geografía radical" o "geografía humanista" aluden a unas corrientes concretas, en un determina-

do contexto, dentro de una cierta problemática. Mientras tanto, otros geógrafos, allí mismo o en otros países, constituyendo probablemente en muchos casos una mayoría, efectúan otras geografías, con otros supuestos y otras motivaciones, por lo menos en parte.

Excelente obra, en conjunto, para recibir una documentada y elaborada información, iluminar unas perspectivas y obligarnos a una reflexión. Acerca de una disciplina que puede tomarse como síntoma, según hemos dicho, de lo que ocurre en ciertas ciencias naturales y en gran parte de las sociales. Probablemente el subtítulo –"introducción" a la geografía– no sea del todo exacto. El mayor provecho, me parece, lo obtendrán no los neófitos sino quienes previamente cuenten ya con una orientación acerca del desarrollo de la geografía o, por lo menos, del conjunto de las ciencias en el pasado siglo y en el actual.

Encontrarán, además, un autor que une la erudición y el sentido crítico, lo que no es corriente; un autor que conoce su materia y al mismo tiempo goza del don de la visión amplia y profunda. Con una joven y vibrante inquietud, con un acusado sentido crítico, a veces con un punto de exceso y una ligera demasía de incisión, lo que puede concretarse en enfoques o afirmaciones, para mi gusto, poco flexibles o matizados, demasiado esquemáticos o tajantes. Pero la actitud en sí misma me parece muy positiva. (J. V. V.)

ENCYCLOPEDIA OF PLANT PHYSIOLOGY. New Series, volumen 13 B. Plant Carbohydrates II. Extracellular Carbohydrates. Editado por W. Tanner y F. A. Loewus. Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, New York), 1981, XXII + 769 páginas. La "Encyclopedia of Plant Physiology, New Series", comenzó a publicarse en 1975. Han aparecido hasta el momento varios volúmenes dedicados a los mecanismos de transporte en plantas, la fisiopatología vegetal, la fotosíntesis, el desarrollo de los vegetales y su regulación hormonal, entre otros temas. Recogen las opiniones, en forma de trabajos de revisión, de especialistas en cada área. El último volumen editado de esta serie, el que ahora nos ocupa, se consagra a la revisión de diferentes aspectos relacionados con los carbohidratos extracelulares de plantas superiores, hongos y algas. Estos son los constituyentes más importantes, cualitativa y cuantitativamente, de la pared celular, estructura superficial que confiere la forma característica a la célula y la protege de factores externos que pudieran dañarla, además de desempeñar otras funciones biológicas importantes.

El contenido de la obra está dividido en cinco secciones generales, con un total de 26 trabajos. La primera sección se dedica a las paredes de las plantas superiores. Hay estudios sobre la composición química y ultraestructura citológica de la pared. Otros, la mayoría, se ocupan de los procesos de biosíntesis, así como del ensamblaje de los distintos constituyentes de la pared, con especial consideración de los procesos de autolisis controlada que intervienen en el crecimiento y extensión de la estructura rígida de la pared. El mérito mayor de la sección reside en la propia relación entre los citados procesos y fenómenos como la diferenciación celular, la senescencia, la germinación, los diferentes tipos de tropismos, etcétera.

En otros tres trabajos se abordan los carbohidratos extracelulares de las algas, sus aspectos bioquímicos y citológicos; de nuevo aquí se incide en el papel de los enzimas autolíticos de la pared en el crecimiento de ésta. Siguen seis colaboraciones centradas en las paredes de los hongos. La razón de un tratamiento de los hongos más pormenorizado que las algas quizá sea doble: porque se conocen mejor los primeros y por la especial afinidad de los editores responsables del volumen con el tema de las paredes fúngicas. En cualquier caso, estos seis trabajos constituyen una revisión magnífica acerca de la estructura y biosíntesis de la pared de los hongos, con especial referencia a la de las levaduras. Quizá se eche en falta un tratamiento más extenso de los aspectos citológicos, aun considerando el dominio limitado que se tiene en este punto.

Dado el carácter extracelular de los carbohidratos estudiados en el volumen, se incluyen tres temas dedicados a los procesos de secreción molecular. El primero describe los mecanismos generales de secreción de macromoléculas: un aspecto de la biología celular de gran actualidad, con bacterias, hongos y células de mamífero como objeto de estudio. Aunque los trabajos con células vegetales están considerablemente más retrasados, se han introducido dos revisiones sobre el tema, con particular hincapié en los procesos de secreción molecular a nivel de los pelos radicales y en su papel en la formación de la rizosfera.

La cuarta sección se centra en los fenómenos biológicos en los que está implicada la superficie celular. Sólo se estudian dos aspectos: los procesos de polinización y el papel de los carbohidratos en los mismos, así como la importancia de estos componentes en la interacción hospedador-parásito en vegetales. Podría haberse añadido aquí algún apartado sobre el papel que los carbohidratos de superficie desempeñan en el reconocimiento entre las células de los tejidos.

La quinta y última parte recoge dos revisiones de unas sustancias de origen vegetal con un carácter muy especial: las lectinas, moléculas de naturaleza proteica o glicoproteica, capaces de unirse selectivamente a diversos tipos de carbohidratos. Se examina la enorme utilidad de las lectinas en estudios bioquímicos y su posible papel, en parte por desvelar todavía, en la naturaleza como protectoras de células vegetales frente a infecciones por microorganismos patógenos.

La gran diversidad de temas tratados hace que la obra adolezca de cierta falta de homogeneidad, circunstancia común a la mayoría de los libros en los que cada capítulo está redactado por uno o varios autores diferentes. El probable esfuerzo coordinador de los editores ha evitado repeticiones innecesarias en distintos capítulos, pero no se ha podido evitar que ciertas partes estén más profundamente tratadas que otras.

El libro cumple su misión de servir como obra de consulta para aquellos investigadores que trabajen en temas relacionados con los expuestos. Dado el elevado nivel de la mayoría de revisiones, se comprende que el volumen vaya dirigido para el especialista, o al menos el iniciado en los temas que en él se contemplan. Por todo lo expuesto, y además porque el texto está redactado con pocas concesiones que hagan grata la labor de lectura, no es en absoluto una obra de tipo general asequible a cualquier lector de literatura científica. Es más, la gran heterogeneidad temática hará que muchos potenciales lectores se dirijan exclusivamente a capítulos determinados. (¡El estudio de los hongos, al menos el de los hongos inferiores, posee hoy más afinidades con el de otros microorganismos que con el de las algas y plantas superiores!)

Por último, queremos resaltar, aun contando con la muy buena calidad de la edición, el elevado precio del volumen, práctica habitual en la editorial responsable que hace difícil su adquisición por aquellos centros de investigación con una capacidad económica discreta. (J. P. M. y E. H. P.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DIOXIDO DE CARBONO Y CLIMA MUNDIAL

ON THE DISTRIBUTION OF CLIMATE CHANGE RESULTING FROM AN INCREASE IN CO_2 CONTENT OF THE ATMOSPHERE. Syukuro Manabe y Richard T. Wetherald en *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 37, n.º 1, págs. 99-118; enero, 1980.

MAJOR CLIMATIC EVENTS ASSOCIATED WITH A PROLONGED CO_2-INDUCED WARMING. Hermann Flohn. Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, octubre, 1981.

LA FARGA CATALANA

LA FARGA CATALANA. A. Gallardo y S. Rubió. Barcelona, 1930.

LA FARGA CATALANA. Pere Molera i Solà. Dopesa; Barcelona, 1980.

METALURGIA GENERAL. F. R. Morral, E. Jimeno y P. Molera. Editorial Reverté, S. A.; Barcelona, 1982.

LAS CORONAS DE LAS GALAXIAS

ON A POSSIBLE INTERSTELLAR GALACTIC CORONA. Lyman Spitzer, Jr., en *The Astrophysical Journal*, vol. 124, n.º 1, págs. 20-34; julio, 1956.

ULTRAVIOLET ABSORPTION BY INTERSTELLAR GAS AT LARGE DISTANCES FROM THE GALACTIC PLANE. Blair D. Savage y Klaas S. de Boer en *The Astrophysical Journal*, vol. 243, n.º 2, 1.ª parte, págs. 460-484; 15 de enero de 1981.

SEARCHING BETWEEN THE STARS. Lyman Spitzer, Jr. Yale University Press, 1982.

GAS IN THE GALACTIC HALO. D. G. York en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, en prensa.

LA ALERGIA

THE MAST CELL: ITS ROLE IN HEALTH AND DISEASE. Dirigido por J. Pepys y A. M. Edwards. University Park Press, 1979.

THE MAST CELL—A FASCINATING RIDDLE. Michael A. Kaliner en *The New England Journal of Medicine*, vol 301, n.º 9, págs. 498-499; 30 de agosto de 1979.

IMMUNOLOGICAL AND CLINICAL ASPECTS OF ALLERGY. Dirigido por M. H. Lessof. J. B. Lippincott Co., 1981.

ANALYSIS OF TRIGGERING EVENTS IN MAST CELLS FOR IMMUNOGLOBULIN E-MEDIATED HISTAMINE RELEASE. Teruko Ishizaka en *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 67, n.º 1, 2.ª parte, págs. 90-96; enero, 1981.

DIFUSION SUPERFICIAL

FIELD EMISSION AND FIELD IONIZATION. Robert Gomer. Harvard University Press, 1961.

FUNDAMENTALS OF STATISTICAL AND THERMAL PHYSICS. F. Reif. McGraw-Hill Book Company, 1965.

FIELD ION MICROSCOPY: PRINCIPLES AND APPLICATIONS. Erwin W. Müller y Tien Tzou Tsong. American Elsevier Publishing Co., 1969.

CHEMISORPTION ON METALS. Robert Gomer en *Solid State Physics*, vol. 30, págs. 93-225; 1975.

DIFFUSION OF HYDROGEN AND DEUTERIUM ON THE 110 PLANE OF TUNGSTEN. Rocco DiFoggio y Robert Gomer en *Physical Review B*, vol. 25, n.º 6, págs. 3490-3511; 15 de marzo de 1982.

COEVOLUCION DE MARIPOSAS Y ENREDADERAS

PLANT CHEMISTRY AND THE EVOLUTION OF HOST SPECIFICITY: NEW EVIDENCE FROM *HELICONIUS* AND *PASSIFLORA*. John Smiley en *Science*, vol. 201, n.º 4357, págs. 745-747; 1978.

FOOD WEB ORGANIZATION AND THE CONSERVATION OF NEOTROPICAL DIVERSITY. Lawrence E. Gilbert en *Conservation Biology: An Evolutionary-Ecological Perspective*, dirigido por Michael E. Soulé y Bruce E. Wilcox. Sinauer Associates, 1980.

INSECTS AS SELECTIVE AGENTS OF PLANT VEGETATIVE MORPHOLOGY: EGG MIMICRY REDUCES EGG LAYING BY BUTTERFLIES. Kathy S. Williams y Lawrence E. Gilbert en *Science*, vol. 212, n.º 4493, págs. 467-469; 24 de abril de 1981.

OFIOLITAS

OPHIOLITES: ANCIENT OCEANIC LITHOSPHERE? Robert G. Coleman. Springer-Verlag, 1977.

OPHIOLITES: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL OPHIOLITES SYMPOSIUM HELD IN NICOSIA, CYPRUS IN 1979. Dirigido por A. Panayiotou. Geological Survey Department, Nicosia, Cyprus, 1980.

THE SEA, VOL. 7: THE OCEANIC LITHOSPHERE. Dirigido por C. Emiliani. John Wiley & Sons, Inc., 1981

EL CASO GALILEO

THE CRIME OF GALILEO. Giorgio de Santillana. University of Chicago Press, 1955.

DISCOVERIES AND OPINIONS OF GALILEO. Stillman Drake. Doubleday Anchor Books, 1957.

GALILEO GALILEI: A BIOGRAPHY AND INQUIRY INTO HIS PHILOSOPHY OF SCIENCE. Ludovico Geymonat. McGraw-Hill Book Company, 1965.

THE CENSORSHIP OF COPERNICUS' *DE REVOLUTIONIBUS*. Owen Gingerich en *Annali dell'Istituto Museo di Storia della Scienze di Firenze*, vol. 4, n.º 2, págs. 45-61; 1981.

TEMAS METAMAGICOS

THE COMPLEAT STRATEGYST. J. D. Williams. McGraw-Hill Book Company, 1954.

GAME THEORY: MATHEMATICAL MODELS OF CONFLICT. A. J. Jones. Ellis Horwood, Ltd., 1980.

A UNIFIED MODEL FOR BARGAINING AND CONFLICT. Douglas Heckathorn en *Behavioral Science*, vol. 25, págs. 261-284; 1980.

TALLER Y LABORATORIO

EDGE WAVES AND BEACH CUPS. Robert T. Guza y Douglas L. Inman en *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, n.º 21, págs. 2997-3012; 20 de julio de 1975.

BREAKING WAVES. E. D. Cokelet en *Nature*, vol. 267, n.º 5614, págs. 769-774; 30 de junio de 1977.

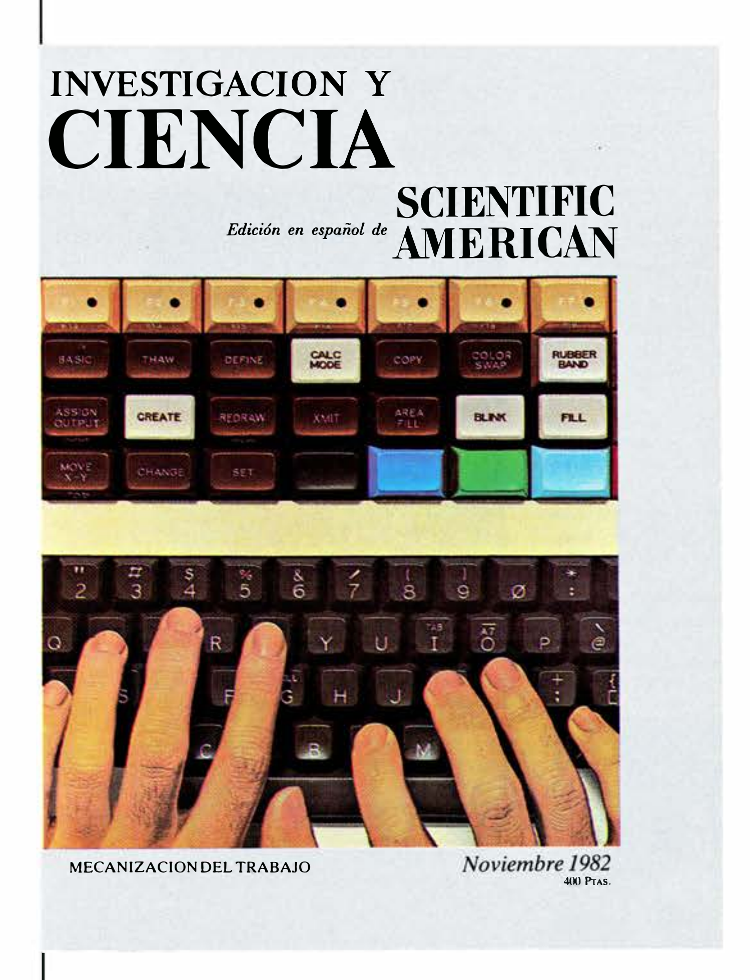
EDGE WAVES AND SURF BEAT. Anthony J. Bowen y Robert T. Guza en *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, n.º C4, págs 1913-1920; 20 de abril de 1978.

WAVES AND BEACHES: THE DYNAMICS OF THE OCEAN SURFACE. Willard Bascom. Doubleday Anchor Books, 1980.

Número extraordinario y monográfico de noviembre

LA MECANIZACION DEL TRABAJO

La revolución industrial prosigue su firme avance como expresión del dominio del hombre sobre la naturaleza y los medios de producción. ¿Cómo?



ARTICULOS

- **Mecanización del trabajo**
- **Mecanización de la agricultura**
- **Mecanización de la minería**
- **Mecanización del diseño y la manufactura**
- **Mecanización del comercio**
- **Mecanización del trabajo de oficina**
- **Mecanización del trabajo femenino**
- **Distribución del trabajo y los ingresos**
- **Mecanización en telecomunicaciones**

La información, el robot y el "terminal" del ordenador no producen el ruido de la máquina de vapor o el salto de agua que alimenta una fábrica textil pero inducen cambios más drásticos en la sociedad y en sus sistemas de valores. Exigen, además, una sólida preparación en el trabajador.

INVESTIGACION Y CIENCIA

recoge en este número lo que será nuestro mundo mañana.